

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Р. М. Галаган, Г. А. Богдан

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою
«Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Рецензенти: *Єременко В.С.*, д-р техн. наук, проф., проф. каф. інформаційно-вимірювальних технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського
Монченко О.В., канд. тех. наук, доцент, доцент каф. біокібернетики та аерокосмічної медицини НАУ

Відповідальний редактор: *Протасов А.Г.*, д-р пед. наук, проф., проф. каф. приладів і систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 13.05.2021 р.)
за поданням Вченої ради Приладобудівного факультету (протокол № 3/21 від 29.03.2021 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Галаган Роман Михайлович, канд. техн. наук, доц.
Богдан Галина Анатоліївна, канд. техн. наук, ст. викладач

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Р. М. Галаган; Г. А. Богдан; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,15 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 145 с.

Навчальний посібник містить теоретичний та прикладний матеріал для виконання лабораторних робіт з ультразвукового неруйнівного контролю та акустичних методів вимірювань. У навчальному посібнику розглянуті теоретичні положення, послідовність та порядок виконання робіт, наведено вимоги щодо оформлення звітів. Навчальний посібник охоплює такі теми, як: дослідження явища суперпозиції та інтерференції хвиль, дисперсії швидкості згинних хвиль, розробка акустичного радару, дослідження параметрів п'єзоелектричних перетворювачів, вимірювання діаграми направленості ультразвукових датчиків, вимірювання товщини об'єкту контролю, пошук дефектів тощо.

Для студентів закладів вищої освіти, що навчаються за освітньою програмою «Роботизовані і автоматизовані системи неруйнівного контролю та діагностики» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Може бути корисним для аспірантів, викладачів та фахівців, що займаються розробкою засобів ультразвукового неруйнівного контролю.

© Р. М. Галаган, Г. А. Богдан, 2021
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП.....	4
Лабораторна робота № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА СУПЕРПОЗИЦІЇ ДВОХ КОЛИВАНЬ	7
Лабораторна робота № 2 ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ НЕРУХОМОЇ ХВИЛІ	16
Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ДОДАВАННЯ ДВОХ ВЗАЄМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНИХ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІГУР ЛІССАЖУ.....	28
Лабораторна робота № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУНА- ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ	40
Лабораторна робота № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТІВ.....	61
Лабораторна робота № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ДИСПЕРСІЇ ШВИДКОСТІ ЗГИННИХ ХВИЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІГУР ХЛАДНІ ...	77
Лабораторна робота № 7 ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕНOSTІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	89
Лабораторна робота № 8 ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУНА- ІМПУЛЬСНОГО ТОВЩИНОМІРА	101
Лабораторна робота № 9 ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛУНА-ІМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОСКОПА.....	111
Лабораторна робота № 10 ПОШУК ДЕФЕКТІВ У БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ МЕТОДОМ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ	122
Лабораторна робота № 11 ДОСЛІДЖЕННЯ ФОКУСУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТИПУ КОНЦЕНТРАТОР.....	132
Лабораторна робота № 12 ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЗГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ	138

ВСТУП

Дисципліна «Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю» (ТОУНК) є однією із базових дисциплін кафедри приладів і систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського, оскільки ультразвуковий неруйнівний контроль є найбільш поширеним серед інших методів контролю. У цій дисципліні викладаються фундаментальні основи теорії механічних коливань, поширення хвиль, ультразвуку, розрахунки акустичних полів та первинних перетворювачів тощо. Також описані різноманітні методи ультразвукового неруйнівного контролю. Знання, набуті студентами під час вивчення дисциплін ТОУНК, можуть бути використані у подальшому під час виконання попередніх розрахунків і проєктування ультразвукових систем для технічної та медичної діагностики, а також під час експлуатації указаних систем.

У цьому навчальному посібнику зібрані та описані лабораторні роботи, які багато років викладаються в лабораторії ультразвукового контролю кафедри приладів і систем неруйнівного контролю. Завдяки виконанню лабораторних робіт студенти можуть на практиці закріпити теоретичні знання, які були набуті ними під час прослуховування лекційних занять з цієї дисципліни.

Лабораторні роботи виконуються бригадами у складі від 3 до 6 осіб. Комплектація бригад повинна бути узгоджена із викладачем, який проводить заняття.

Оскільки під час виконання лабораторних робіт студентам доводиться працювати із складним електричним обладнанням (зокрема, дефектоскопи, товщиноміри, комп'ютери, блоки живлення), що живиться від електричної мережі, то особлива увага має бути приділена дотриманню правил техніки безпеки. Перед початком робіт усі студенти зобов'язані пройти інструктаж з техніки безпеки та отримати допуск.

Для успішного допуску, виконання та захисту лабораторних робіт студент повинен дотримуватись таких правил:

1. До виконання лабораторних робіт допускаються лише студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та неухильно її дотримуються. Якщо студент порушує правила техніки безпеки, то він може бути відсторонений від виконання лабораторної роботи. Допуститись він може тільки повторно прослухавши та пояснивши правила техніки безпеки.

2. Перед початком виконання лабораторної роботи студенти мають отримати допуск, який полягає у тому, що вони мають чітко розказати викладачу теоретичні основи роботи, хід роботи, пояснити, які дані вони мають отримати та як їх в подальшому обробити. Кожна бригада повинна мати як мінімум один роздрукований протокол роботи.

3. Після отримання допуску студенти повинні ознайомитися з робочим місцем та приладом (лабораторним устаткуванням), який використовується для проведення роботи, розміщенням органів керування, а також з допоміжними інструкціями та схемами.

4. Перед увімкненням приладу (лабораторного устаткування) необхідно переконатися у справності всіх заземлень та захисних механізмів, а також перевірити наявність захисних діелектричних засобів у відповідності до правил техніки безпеки.

5. До виконання лабораторної роботи можна приступати тільки з дозволу викладача. Під час виконання роботи студенти мають перебувати на робочому місці, у іншому випадку студент може вважатись таким, що не виконав роботу.

6. Після виконання усіх частин завдання лабораторної роботи студенти мають показати викладачеві отримані дані. У випадку коректності результатів викладач ставить підпис на протоколі лабораторної роботи, який засвідчує її виконання.

7. Після завершення виконання роботи вимкнення приладу (устаткування) здійснюється лише після дозволу викладача.

8. Якщо у протоколі передбачена деяка обробка отриманих даних, їх візуалізація тощо, то це необхідно робити у спеціалізованих програмах (а не вручну), зокрема, Excel, MATLAB, MathCAD, Python та інші.

9. Після оформлення усіх результатів та їх роздруківки студенти повинні захистити виконану лабораторну роботу. Захист відбувається індивідуально шляхом відповідей на запитання, які приведені у кінці кожної роботи.

10. На основі відповідей студент отримує бали за виконання лабораторної роботи, які формують його рейтинг із дисципліни.

Насамкінець розглянемо деякі важливі правила, яких необхідно дотримуватись у лабораторії ультразвукового неруйнівного контролю:

- у самій лабораторії не допускається вживання їжі та напоїв;
- забороняється порушувати правила та порядок проведення лабораторної роботи;
- забороняється пошкоджувати використовуване обладнання та майно лабораторії;
- забороняється присутність осіб, які не мають стосунку до виконання лабораторних робіт.

У випадку порушення цих правил студент може бути відсторонений від виконання лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА СУПЕРПОЗИЦІЇ ДВОХ КОЛИВАНЬ

Мета роботи: дослідити явище суперпозиції двох коливань; розробити віртуальний прилад в середовищі LabView для додавання двох гармонійних коливань і виведення результату через звукову карту на колонки; дослідити явище биття.

1.1. Основні положення

Якщо властивості середовища не змінюються під дією збурень, створених хвилею, то до них можна застосувати принцип суперпозиції (накладення хвиль), який полягає у наступному: при поширенні у такому середовищі декількох хвиль, кожна з них поширюється так, ніби інші хвилі відсутні, а результуюче зміщення частинки середовища дорівнює геометричній сумі зсувів частинок.

Биття – це явище, яке виникає при накладенні двох близьких за частотою періодичних гармонійних коливань одного напрямку, що виражається у періодичному зменшенні і збільшенні амплітуди сумарного сигналу. Частота зміни амплітуди сумарного сигналу дорівнює різниці частот вихідних сигналів. Биття виникають від того, що один з двох сигналів лінійно в часі відстає від іншого за фазою, і у ті моменти, коли коливання відбуваються синфазно, сумарний сигнал виявляється максимальний, а у ті моменти, коли два сигнали виявляються у протифазі, вони взаємно гасять один одного. Ці моменти періодично змінюють один одного в міру того, як наростає відставання.

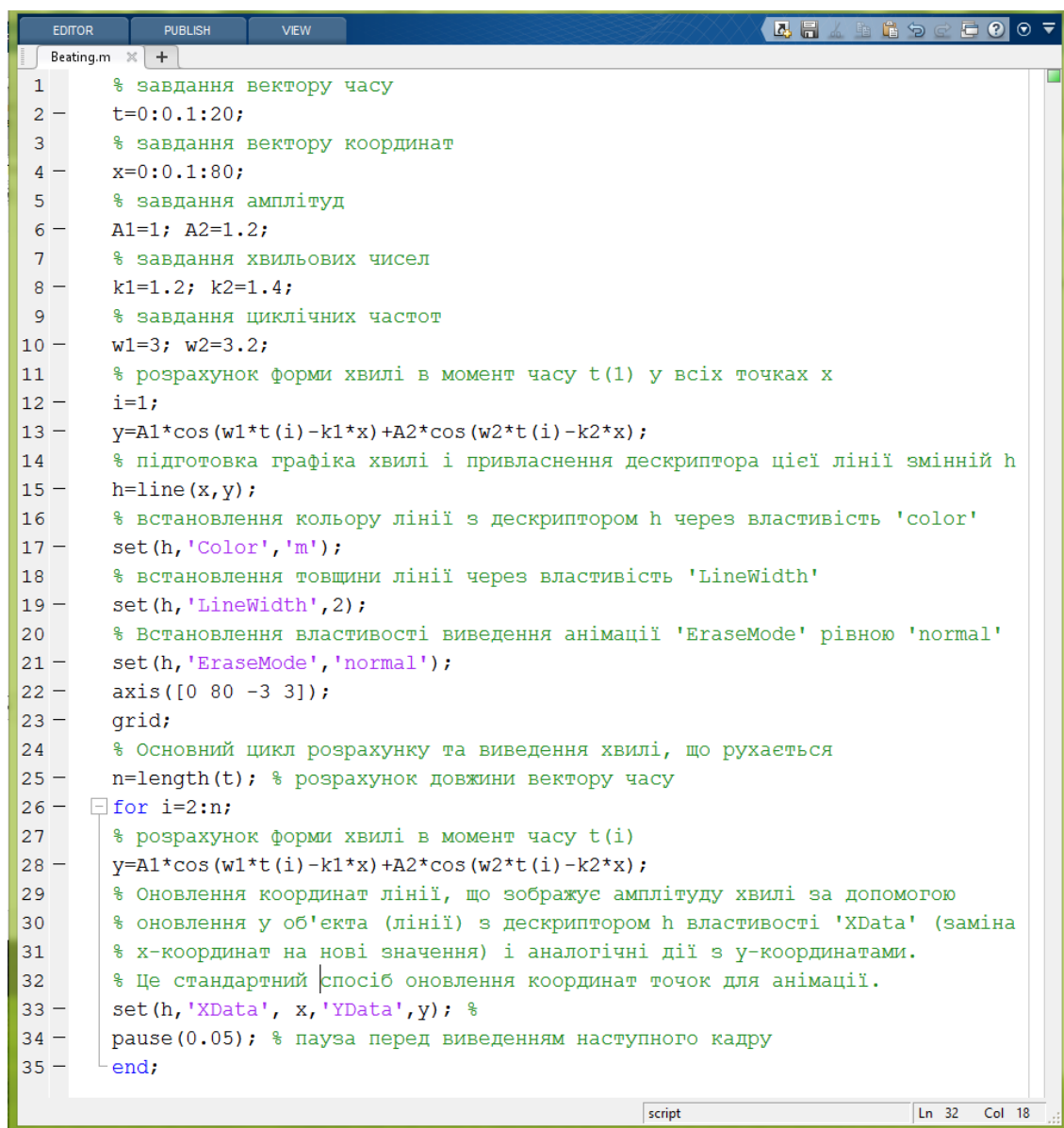
Формула биття, як результат складання двох гармонійних плоских хвиль, що біжать в одному напрямку, має наступний вигляд:

$$f(x,t) = A_1 \cdot \cos(\omega_1 t - k_1 x) + A_2 \cdot \cos(\omega_2 t - k_2 x),$$

де A_1 , A_2 – амплітуди коливань, ω_1 , ω_2 – циклічні частоти (причому $|(\omega_1 - \omega_2)/\omega_1| \ll 1$), k_1 , k_2 – хвильові числа, t – час, x – просторова координата.

1.2. Експериментальна частина

Спочатку написати програму для виведення анімованого графіку биття в програмі MATLAB. Приклад коду наведено на рис. 1.1.



```

1  % завдання вектору часу
2  t=0:0.1:20;
3  % завдання вектору координат
4  x=0:0.1:80;
5  % завдання амплітуд
6  A1=1; A2=1.2;
7  % завдання хвильових чисел
8  k1=1.2; k2=1.4;
9  % завдання циклічних частот
10 w1=3; w2=3.2;
11 % розрахунок форми хвилі в момент часу t(1) у всіх точках x
12 i=1;
13 y=A1*cos(w1*t(i)-k1*x)+A2*cos(w2*t(i)-k2*x);
14 % підготовка графіка хвилі і привласнення дескриптора цієї лінії змінній h
15 h=line(x,y);
16 % встановлення кольору лінії з дескриптором h через властивість 'color'
17 set(h,'Color','m');
18 % встановлення товщини лінії через властивість 'LineWidth'
19 set(h,'LineWidth',2);
20 % Встановлення властивості виведення анімації 'EraseMode' рівною 'normal'
21 set(h,'EraseMode','normal');
22 axis([0 80 -3 3]);
23 grid;
24 % Основний цикл розрахунку та виведення хвилі, що рухається
25 n=length(t); % розрахунок довжини вектору часу
26 for i=2:n;
27     % розрахунок форми хвилі в момент часу t(i)
28     y=A1*cos(w1*t(i)-k1*x)+A2*cos(w2*t(i)-k2*x);
29     % Оновлення координат лінії, що зображує амплітуду хвилі за допомогою
30     % оновлення у об'єкта (лінії) з дескриптором h властивості 'XData' (заміна
31     % x-координат на нові значення) і аналогічні дії з y-координатами.
32     % Це стандартний спосіб оновлення координат точок для анімації.
33     set(h,'XData', x,'YData',y); %
34     pause(0.05); % пауза перед виведенням наступного кадру
35 end;

```

Рис. 1.1. Лістинг програми для візуалізації биття у MATLAB

Після реалізації програми у MATLAB розробити віртуальний прилад у середовищі LabView, за допомогою якого виводити биття через акустичні колонки.

Із головного вікна LabView спочатку виконати команду **Help** → **Find Examples**. За допомогою інструментів пошуку знайти приклад **Generate Sound.vi**. Відкрити його блок-діаграму (рис. 1.2) і скопіювати всі дані у новий проєкт. Після чого можна закрити приклад **Generate Sound.vi**, тому що надалі вся робота і внесення змін відбуватимуться у новому проєкті.

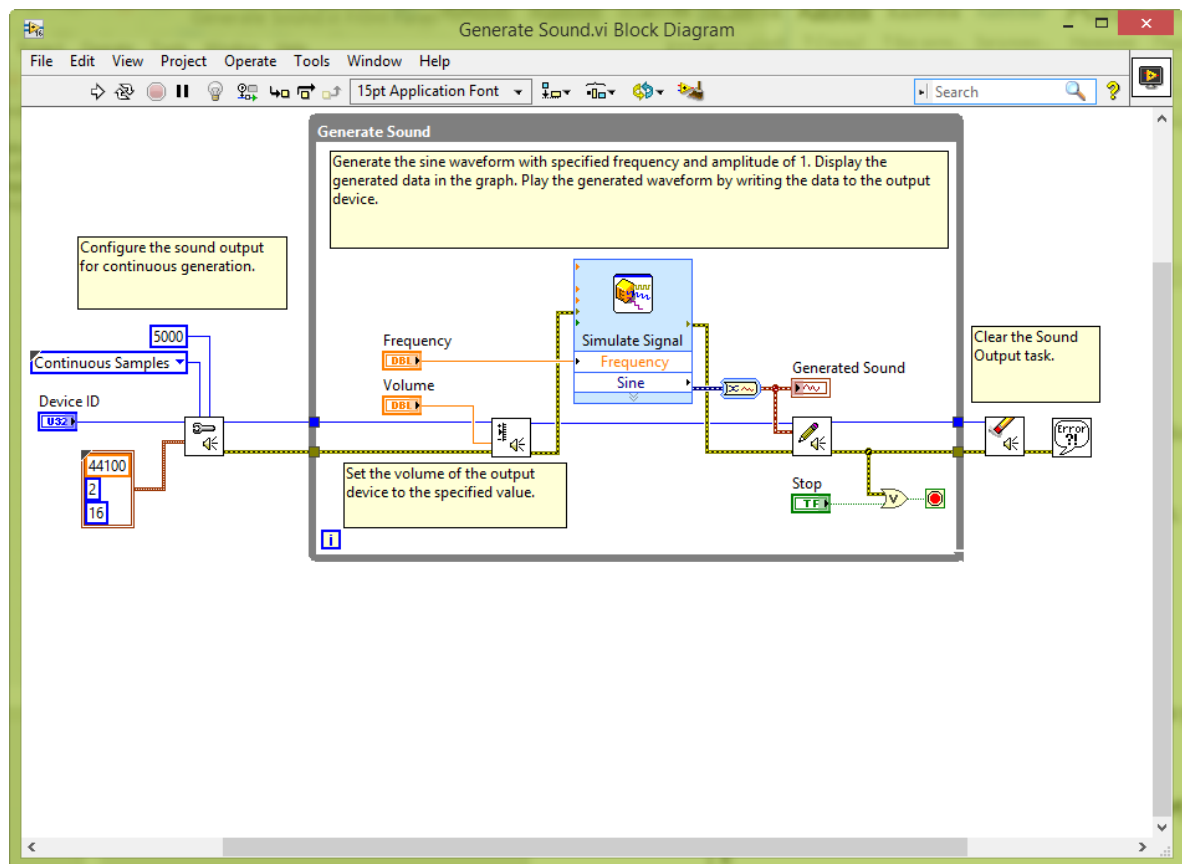


Рис. 1.2. Блок-діаграма Generate Sound.vi

Запустити програму на виконання і перевірити, чи генерується звук через колонки, які заздалегідь підключити до комп'ютера.

Модифікувати програму, встановивши другий блок **Simulate Signal** та блок додавання двох сигналів (рис. 1.3). Також встановити елементи керування амплітудою кожного сигналу.

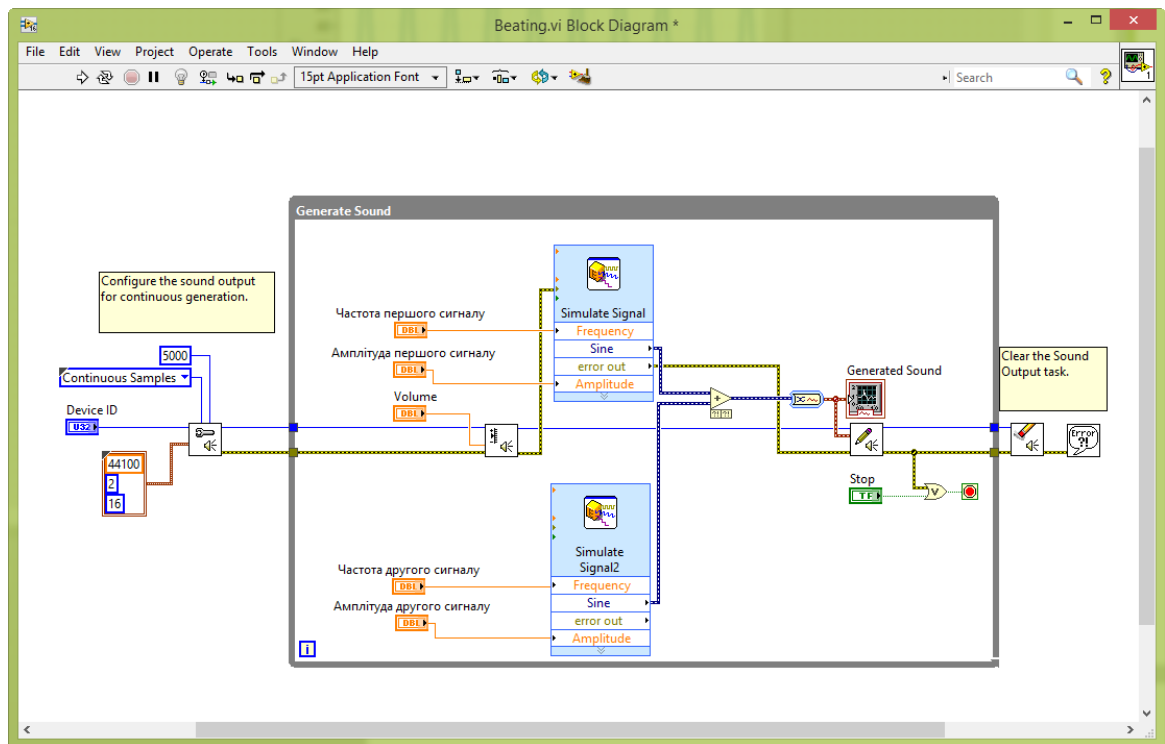


Рис. 1.3. Блок-діаграма розробленого віртуального приладу

Лицьова панель повинна містити елементи, що представлені на рис. 1.4.

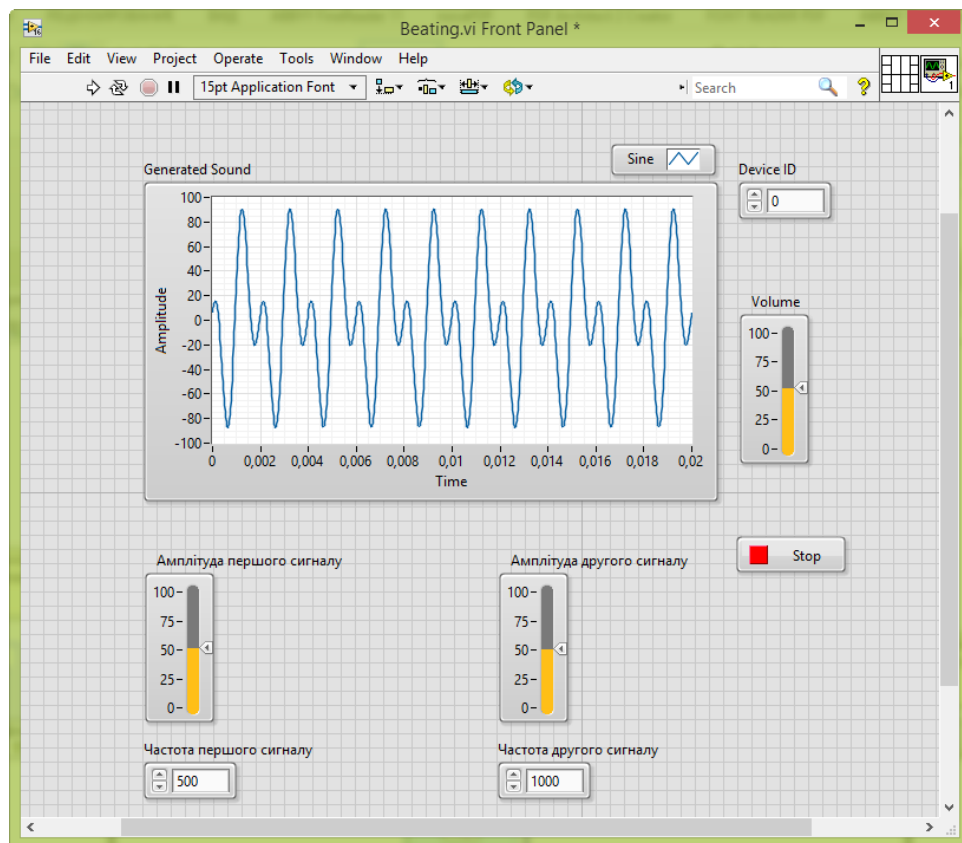


Рис. 1.4. Лицьова панель віртуального приладу

Відкрити меню кожного блоку **Simulate Signal** і в полі **Number of samples** ввести число 20000. Те ж саме зробити у блоці конфігурації виходу звукової карти (рис. 1.5).

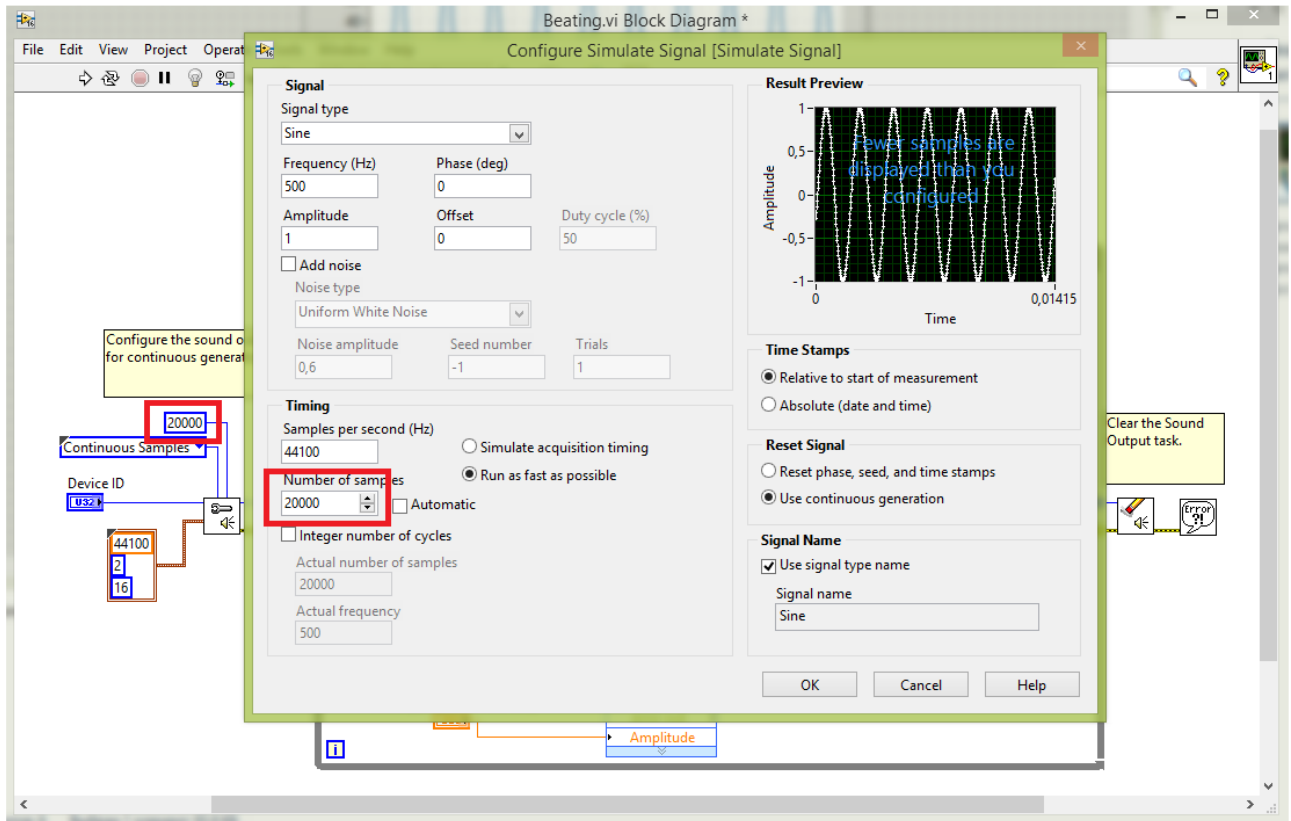




Рис. 1.5. Налаштування блоку Simulate Signal

Модифікувати схему таким чином, щоб була можливість програмно відключати одне з джерел сигналів. Для цього використовувати блок **Case Structure**, що знаходиться в палітрі **Programming** → **Structures**.

Продовжити модифіковувати програму, встановивши блок для розрахунку спектру **Spectral Measurements**, який знаходиться у вкладці **Express** → **Signal Analysis** панелі **Functions**. Додати ще одне графічне вікно, у яке виводити розрахований спектр результуючого сигналу.

Замінити блок додавання двох сигналів  на блок множення . Порівняти результати.

Розробити схему демодулятора, до складу якого повинні входити блок **Absolute** та **Value Add** із палітри **Programming** → **Numeric**. З виходу схеми

демодулятора сигнал подається на вхід фільтра нижніх частот (палітра **Express** → **Signal Analysis**). Параметри фільтра встановити такі, як на **рис. 1.6**.

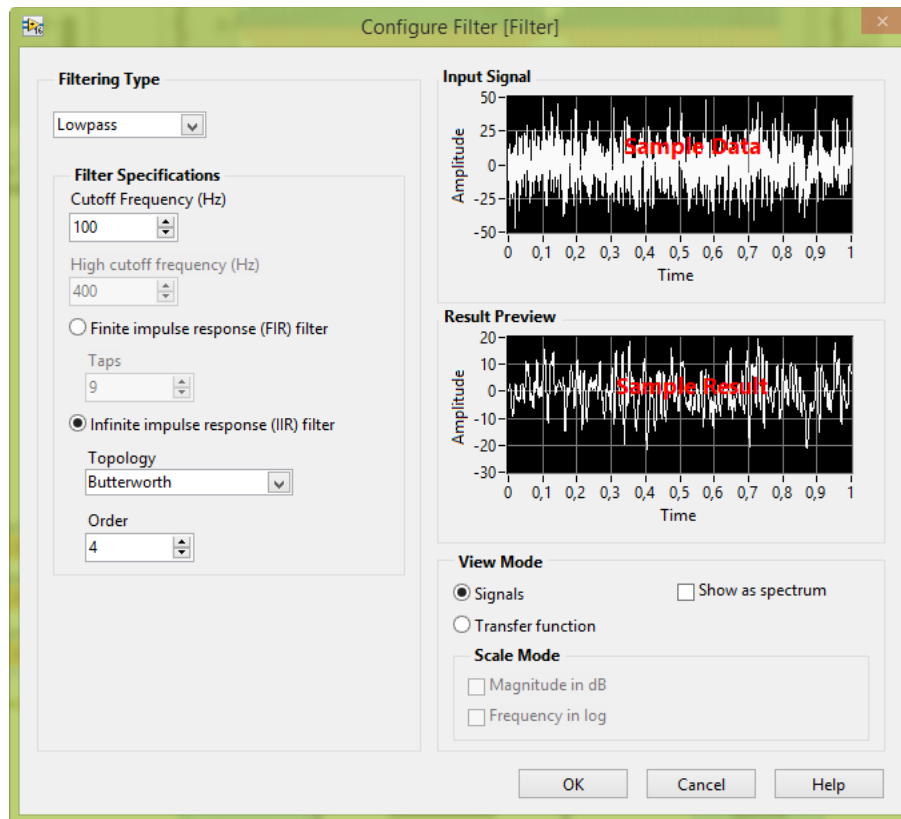


Рис. 1.6. Вікно налаштувань фільтра

Сигнал з виходу фільтра вивести у тому ж графічному вікні, у якому відображається результуючий сигнал. Для виведення в одному графічному вікні двох різних сигналів використовувати елемент **Build Array** із палітри **Programming** → **Array**. На **рис. 1.7** представлена частина блок-діаграми, на якій показана реалізація демодулятора і виведення графіка в одне графічне вікно.

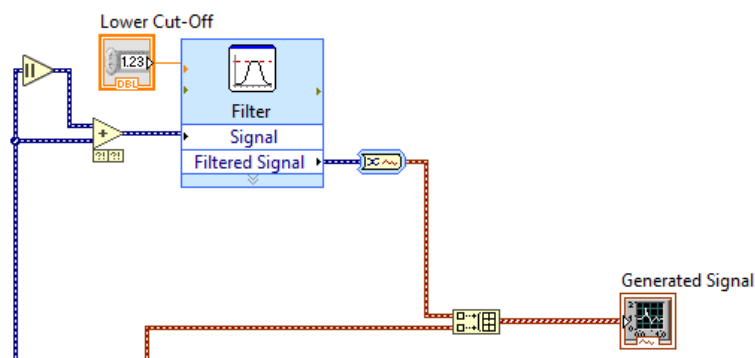


Рис. 1.7. Реалізація демодулятора

Модифікувати програму, встановивши для демодульованого сигналу блок розрахунку параметрів сигналів **Tone Measurements**, який знаходиться у вкладці **Express** → **Signal Analysis** панелі **Functions**. Відкрити вікно властивостей блоку і обрати для відображення частоту. Додати на виході блоку індикатор для відображення розрахованої частоти демодульованого сигналу.

Встановити частоту першого сигналу 500 Гц, другого – 520 Гц. Запустити програму і подивитись визначену частоту демодульованого сигналу (вона повинна дорівнювати різниці частот двох вихідних сигналів, тобто, у цьому випадку 20 Гц). Після чого встановити частоту 500 Гц і 501 Гц відповідно. Якщо визначена частота не дорівнює 1 Гц, то це означає, що необхідно змінити певні налаштування блоків **Simulate Signal** та **Sound Output Configure.vi**. Параметр, який необхідно змінювати, називається **Number of samples**. Самостійно підібрати такі значення цього параметру, які дозволяють правильно визначити частоту 1 Гц демодульованого сигналу.

Виконати дослідження для сигналів, що мають наступні характеристики:

- частота першого сигналу 1000 Гц, другого – 1010 Гц;
- частота першого сигналу 900 Гц, другого – 1100 Гц.

1.3. Оформлення експериментальних результатів

Роздрукувати знімок з екрана з кінцевим варіантом блок-діаграми та лицьової панелі розробленого віртуального приладу.

Роздрукувати графіки результуючого сигналу і його спектру при додаванні двох сигналів із характеристиками, що були зазначені наприкінці пп. 1.2.

Для цих же сигналів замінити операцію додавання на множення і також зберегти їх графіки.

1.4. Контрольні запитання

1. Поясніть принцип суперпозиції.
2. Поясніть явище биття.
3. Опишіть процес створення програми у середовищі NI LabView для цієї лабораторної роботи.
4. Поясніть, що таке параметр «Number of samples» і на що він впливає.
5. Поясніть, як використовується і налаштовується блок Case Structure.
6. Поясніть відмінність спектрів результуючого сигналу у випадку додавання і множення двох гармонійних сигналів.
7. Поясніть, чому демодульований сигнал на графіку відстає у часі від модульованого сигналу?
8. Використовуючи тригонометричні формули поясніть, яким чином визначається частота і амплітуда результуючого коливання у випадку:
а) додавання двох гармонійних сигналів; б) множення двох гармонійних сигналів.

Список використаних джерел для лабораторної роботи №1

1. Пейн Г. Физика колебаний и волн: пер. с англ. / Г. Пейн. – М.: Мир, 1979. – 389 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 508 с.
3. Кузнецов Ю.В. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов: Учебное пособие / Ю.В. Кузнецов, А.Б. Баев. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 95 с.
4. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С. Магда. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

5. Федосов В.П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / В.П. Федосов, А.К. Нестеренко – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

6. Евдокимов Ю.К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

7. Ануфриев И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

8. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ В ПОВІТРІ

МЕТОДОМ НЕРУХОМОЇ ХВИЛІ

Мета роботи: експериментально дослідити явище акустичного резонансу; визначити швидкість звуку в повітрі; розробити віртуальний прилад в середовищі LabView для зчитування даних із входу звукової карти.

2.1. Основні положення

Процес поширення коливань у просторі називається хвилею. Швидкість поширення поздовжніх пружних хвиль у газах визначається за формулою:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

де γ – відношення питомої теплоємності при постійному тиску до питомої теплоємності у сталому об'ємі (для повітря $\gamma=1,4$); $R=8,31$ Дж/моль·К – молярна газова постійна; T – температура за шкалою Кельвіна; M – молярна маса (для повітря $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль).

Між довжиною звукової хвилі λ , частотою коливання f та швидкістю звуку C існує наступна залежність:

$$C = \lambda \cdot f$$

Тобто, для визначення швидкості звуку необхідно знати частоту коливань і довжину звукової хвилі. Якщо використовувати джерело звуку з відомою частотою, то для визначення швидкості звуку необхідно знати лише довжину звукової хвилі.

Для визначення довжини звукової хвилі, яка збуджується генератором звуку, можна використовувати явище виникнення нерухомої хвилі (рис. 2.1).

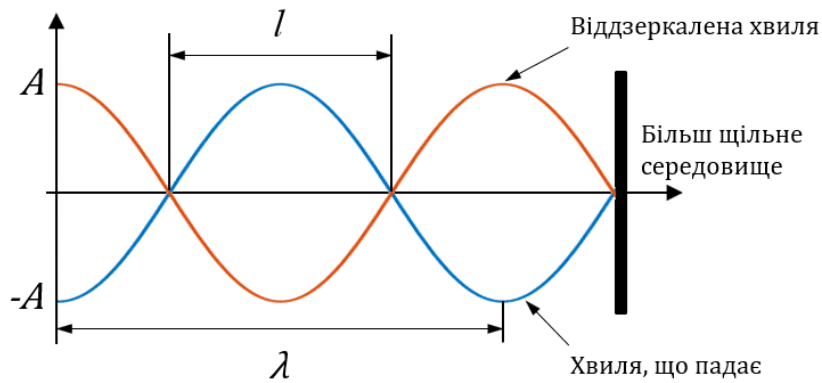


Рис. 2.1. Графічна візуалізація нерухомої хвилі

Рівняння двох плоских хвиль, що поширюються уздовж осі x у протилежних напрямках, має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \xi_1 = A \cos(\omega t - kx) \\ \xi_2 = A \cos(\omega t + kx) \end{cases}$$

Під час поширення двох однакових плоских хвиль у протилежних напрямках, що має місце, наприклад, при нормальному віддзеркаленні хвилі від межі поділу двох середовищ, у кожній точці середовища коливання, які обумовлені падаючою та відбитою хвилями, додаються. У такому випадку утворюється результуюче коливання з тією ж довжиною хвилі, але таке, що не переміщується у просторі. Таке коливання називається **нерухомою хвилею** і описується наступним рівнянням:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos\left(\frac{\omega t - kx + \omega t + kx}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega t - kx - \omega t - kx}{2}\right)$$

Виконавши деякі перетворення, отримаємо спрощене рівняння нерухомої хвилі:

$$\xi(x, t) = 2A \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) = 2A \cdot \cos\left(\omega \frac{x}{C}\right) \cdot \cos(\omega t)$$

Нерухомі хвилі є окремим випадком інтерференції хвиль. Вони характеризуються вузлами (точками, в яких відсутні коливання) та пучностями (точками, амплітуда коливань в яких максимальна). Коливання в усіх точках нерухомої хвилі, що лежать між двома сусідніми вузлами, відбуваються з

різними амплітудами, але з однаковими фазами. Відстань між сусідніми вузлами або сусідніми пучностями нерухомої хвилі називається довжиною нерухомої хвилі l , яка дорівнює половині довжини хвилі, що біжить:

$$\lambda = 2l$$

Строго кажучи, нерухома хвиля може існувати тільки при відсутності втрат у середовищі поширення і повного віддзеркалення падаючої хвилі. У реальному середовищі існує режим змішаних хвиль: крім нерухомої хвилі присутня і хвиля, що біжить, яка переносить енергію до місць поглинання і випромінювання.

Важливо враховувати, що хвиля може віддзеркалюватись від різних типів меж, а саме: м'якої (коли імпеданс середовища, у якому поширюється хвиля, більший за імпеданс середовища, від якого хвиля віддзеркалюється) та твердої (коли імпеданс середовища, у якому поширюється хвиля, менший за імпеданс середовища, від якого хвиля віддзеркалюється). На рис. 2.2 схематично показано віддзеркалення хвилі від м'якої та твердої межі.

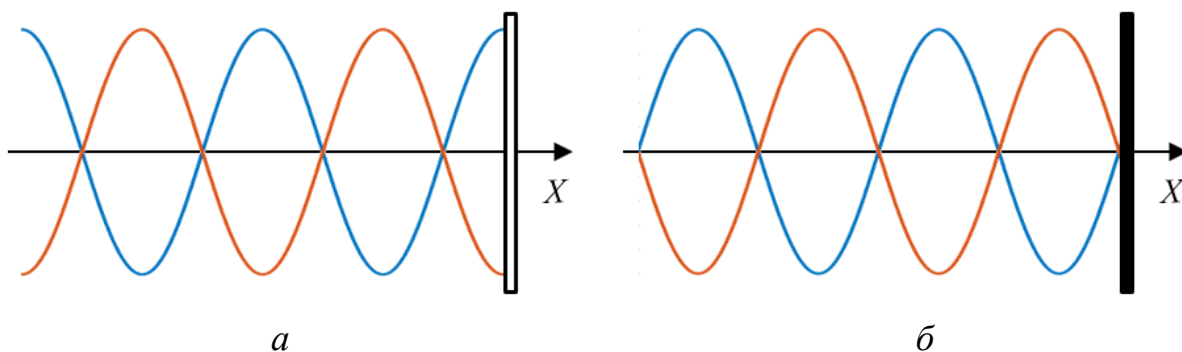


Рис. 2.2. Віддзеркалення хвилі від: *a* – м'якої межі, *б* – твердої межі

Нерухомі хвилі утворюються, наприклад, у скляній трубці, яка закрита з одного кінця рухомою перешкодою. Якщо біля відкритого кінця трубки помістити динамік, з'єднаний з генератором, то коливання його мембрани передаються повітряному стовпу в трубці. Повітряний стовп буде резонувати¹

¹ Резонанс – це різке зростання амплітуди вимушених коливань у коливальній системі при наближенні частоти зовнішньої сили (що викликає вимушені коливання) до частоти власних коливань цієї коливальної системи.

тільки у тому випадку, якщо період його власних коливань збігається з періодом коливань звуку, який видається звуковим генератором.

У цьому випадку маємо акустичний резонанс, тобто явище, при якому коливання стовпа повітря в трубці досягають максимальної амплітуди. Це відбувається тоді, коли частота звукових коливань мембрани (зовнішня, збуджуюча сила) наближається до однієї з власних частот повітряного стовпа в трубці. Ця частота називається резонансною частотою. При резонансній частоті звучання повітряного стовпа в трубці максимальне.

Звукова хвиля від динаміка, розміщеного біля відкритого кінця трубки, поширюючись у повітрі і дійшовши до перепони, що знаходиться на другому кінці трубки, віддзеркалюється, змінить фазу на протилежну (тому що віддзеркалення відбувається від більш щільного середовища) і почне рухатись назустріч падаючій хвилі, що біжить. Інтерференція падаючої та віддзеркаленої хвиль призведе до появи нерухомої хвилі.

Якщо визначити найменшу відстань між динаміком та перпоною на другому кінці трубки і позначити її як L , то довжину нерухомої хвилі можна визначити як (див. рис. 2.3а):

$$l = 2L$$

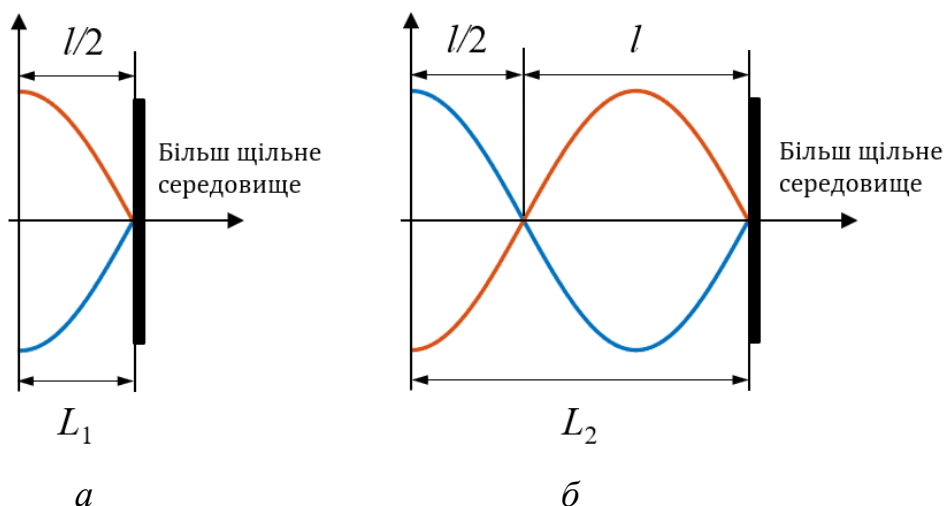


Рис. 2.3. Відстані, на яких виникають пучності нерухомої хвилі:

a – перша пучність, b – друга пучність

Друга пучність виникне на відстані $L_2=(3/2)l$ (рис. 2.3б), третя – на відстані $(5/2)l$ тощо.

Швидкість звуку в повітрі залежить від багатьох чинників, зокрема й температури:

$$C = C_0 \sqrt{1 + \alpha T} ,$$

де T – температура, $C_0=332$ м/с – швидкість звуку за температури 0°C , α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря ($\alpha = 0,0037$ [1/°C]).

Таким чином, вимірявши швидкість звуку в повітрі, можна визначити поточну температуру:

$$T = \frac{\left(\frac{C}{C_0}\right)^2 - 1}{\alpha} \quad (2.1)$$

На рис. 2.4 представлена залежність швидкості звуку від температури у повітрі.

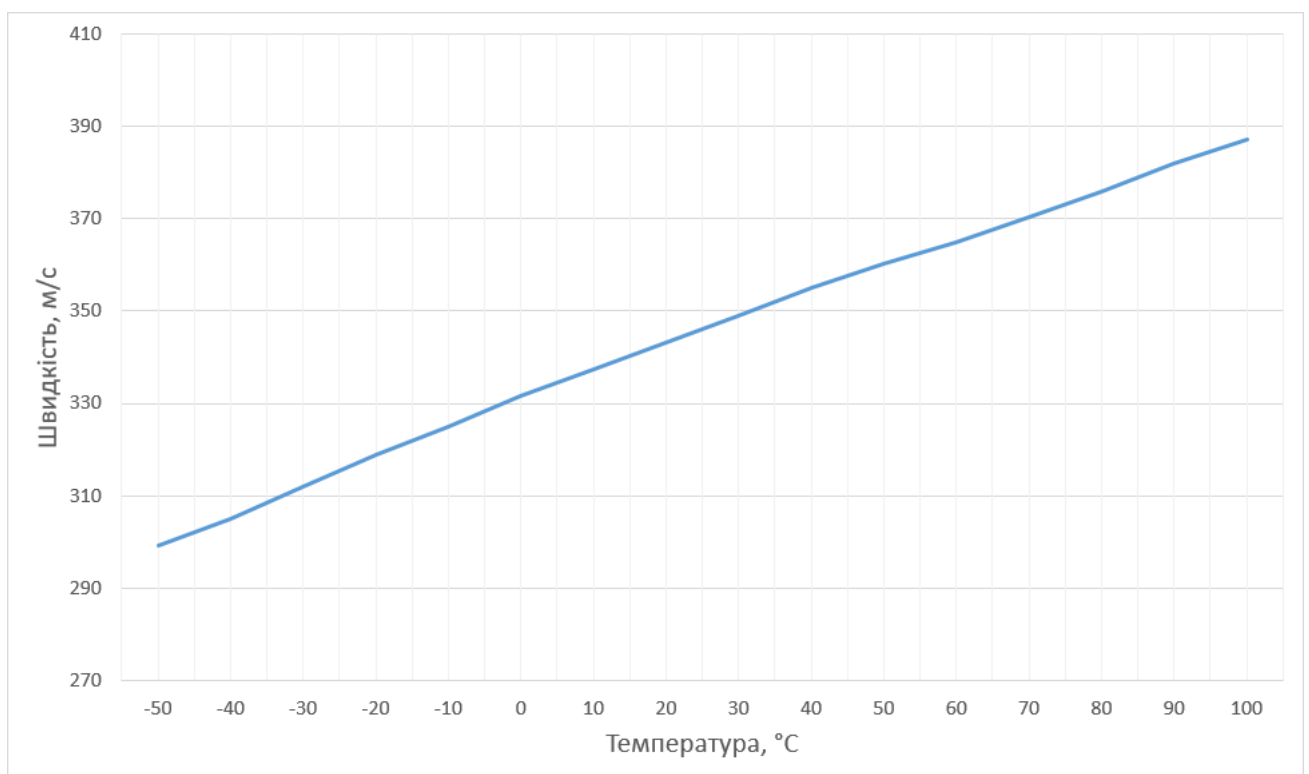


Рис. 2.4. Залежність швидкості звуку від температури в повітрі при тиску 1 атм

2.2. Опис експериментальної установки

Прилад для визначення довжини звукової хвилі зображений на рис. 2.5. Основою приладу є скляна трубка (1), у якій власне і формується нерухома хвиля. З однієї сторони трубки розташований рухомий поршень (2), а перед іншою знаходиться динамік (3), який збуджує акустичну хвилю заданої частоти. Для управління гучністю динаміка використовується підсилювач (4). Поряд із трубкою кріпиться лінійка з міліметровим масштабом (5), завдяки якій вимірюється відстань від відкритого краю трубки до рухомого поршня у момент виникнення резонансу. Для прийому акустичних хвиль і реєстрації моменту виникнення резонансу (за збільшенням амплітуди коливань) використовується мікрофон (6).

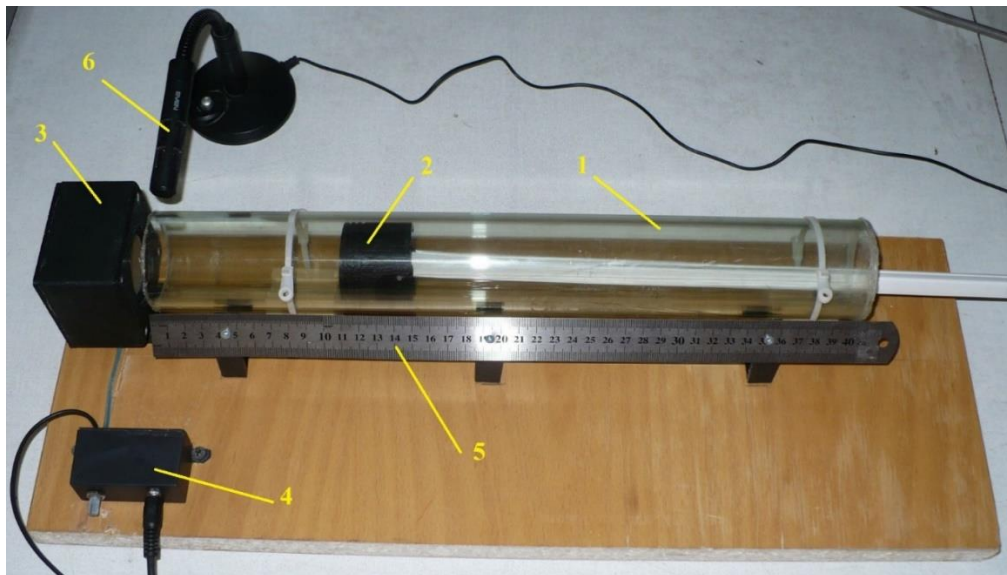


Рис. 2.5. Зовнішній вигляд лабораторного стану

Для створення гармонійних коливань можна використати спеціалізоване програмне забезпечення. В ОС Android рекомендується використовувати програму Signal Generator або Function Generator із Google Play. В ОС Windows рекомендується використовувати програму Frequency Generator.

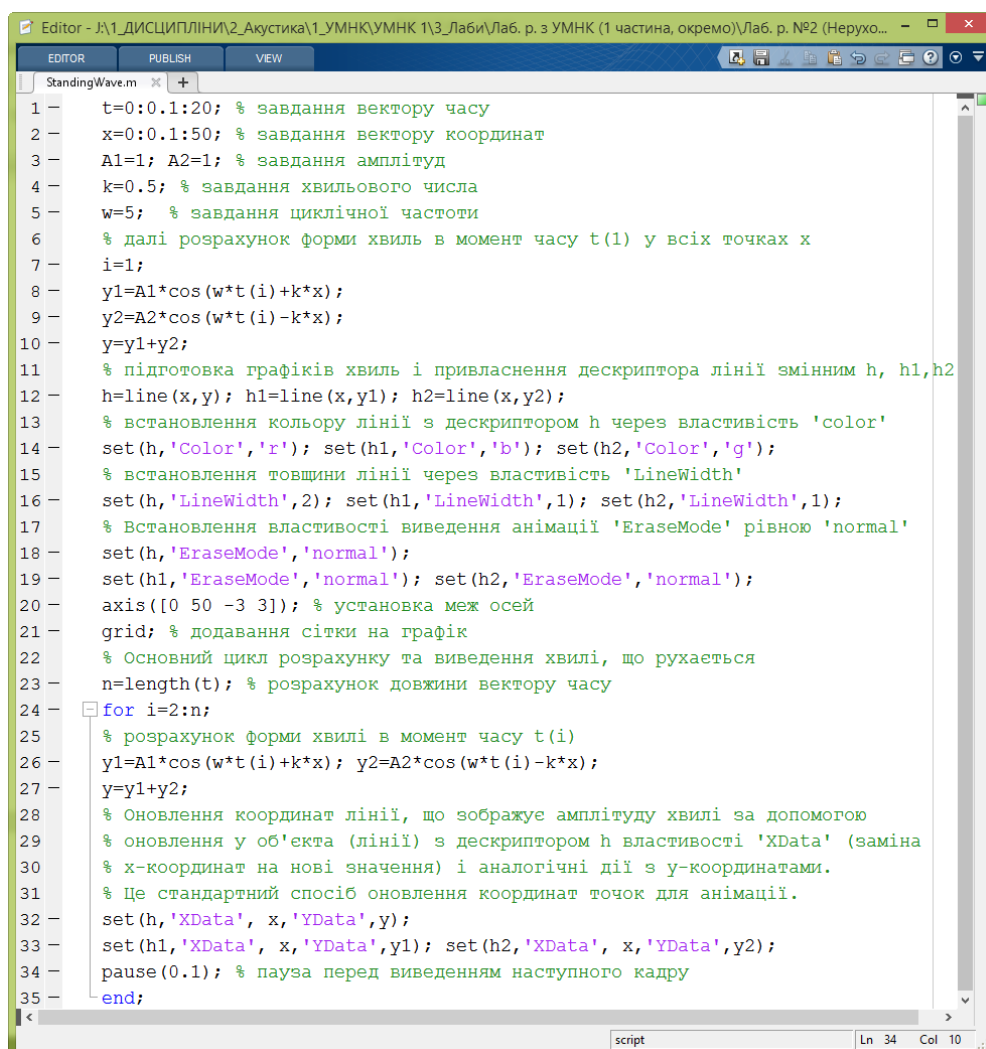
Звукова хвиля, що збуджується динаміком, поширюється в трубці і віддзеркалюється від поверхні поршня. У результаті інтерференції прямої і зворотної хвиль утворюється нерухома хвиля. Переміщуючи поршень можна

досягнути такої відстані між динаміком і поршнем, коли виникатиме резонанс та значне підсилення звуку.

2.3. Експериментальна частина

Ознайомитись із відеоматеріалами², які ілюструють явище виникнення нерухомої хвилі.

Написати програму в середовищі MATLAB, за допомогою якої можна візуалізувати явище виникнення нерухомої хвилі. Лістинг програми приведений на рис. 2.6.



```
1 t=0:0.1:20; % завдання вектору часу
2 x=0:0.1:50; % завдання вектору координат
3 A1=1; A2=1; % завдання амплітуд
4 k=0.5; % завдання хвильового числа
5 w=5; % завдання циклічної частоти
6 % далі розрахунок форми хвиль в момент часу t(1) у всіх точках x
7 i=1;
8 y1=A1*cos(w*t(i)+k*x);
9 y2=A2*cos(w*t(i)-k*x);
10 y=y1+y2;
11 % підготовка графіків хвиль і привласнення дескриптора лінії змінним h, h1,h2
12 h=line(x,y); h1=line(x,y1); h2=line(x,y2);
13 % встановлення кольору ліній з дескриптором h через властивість 'color'
14 set(h,'Color','r'); set(h1,'Color','b'); set(h2,'Color','g');
15 % встановлення товщини ліній через властивість 'LineWidth'
16 set(h,'LineWidth',2); set(h1,'LineWidth',1); set(h2,'LineWidth',1);
17 % Встановлення властивості виведення анімації 'EraseMode' рівною 'normal'
18 set(h,'EraseMode','normal');
19 set(h1,'EraseMode','normal'); set(h2,'EraseMode','normal');
20 axis([0 50 -3 3]); % установка меж осей
21 grid; % додавання сітки на графік
22 % Основний цикл розрахунку та виведення хвилі, що рухається
23 n=length(t); % розрахунок довжини вектору часу
24 for i=2:n;
25 % розрахунок форми хвилі в момент часу t(i)
26 y1=A1*cos(w*t(i)+k*x); y2=A2*cos(w*t(i)-k*x);
27 y=y1+y2;
28 % Оновлення координат ліній, що зображує амплітуду хвилі за допомогою
29 % оновлення у об'єкта (ліній) з дескриптором h властивості 'XData' (заміна
30 % x-координат на нові значення) і аналогічні дії з y-координатами.
31 % Це стандартний спосіб оновлення координат точок для анімації.
32 set(h,'XData', x,'YData',y);
33 set(h1,'XData', x,'YData',y1); set(h2,'XData', x,'YData',y2);
34 pause(0.1); % пауза перед виведенням наступного кадру
35 end;
```

Рис. 2.6. Код програми для візуалізації явища виникнення нерухомої хвилі

² Необхідно отримати у викладача.

Далі розробити віртуальний прилад у середовищі LabView, за допомогою якого зчитувати дані із входу звукової карти.

Із головного вікна LabView спочатку виконати команду **Help** → **Find Examples**. За допомогою інструментів пошуку знайти приклад **Continuous Sound Input.vi**. Відкрити його блок-діаграму (рис. 2.7) і скопіювати всі дані у новий проєкт. Після чого можна закрити приклад **Continuous Sound Input.vi**, тому що надалі вся робота і внесення змін відбуватимуться у новому проєкті.

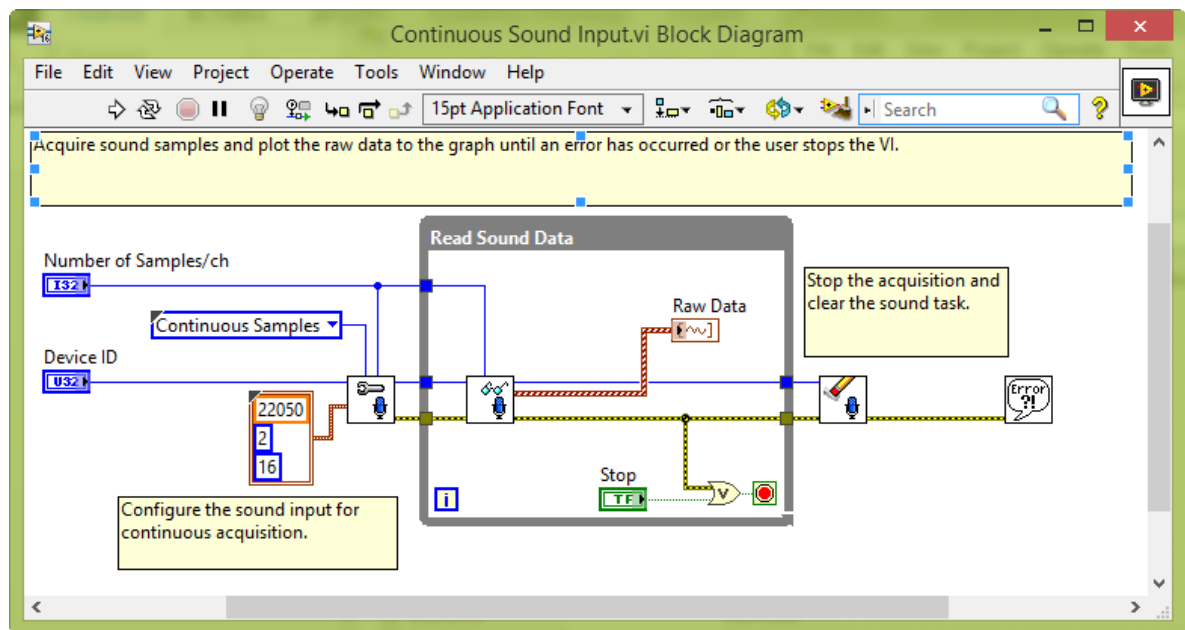


Рис. 2.7. Блок-діаграма Continuous Sound Input.vi

Підключити мікрофон, запустити програму на виконання і перевірити, чи зчитується звук.

Модифікувати програму, встановивши блок **Filter**, який знаходиться у вкладці **Express** → **Signal Analysis** панелі **Functions**. Використання фільтра передбачає необхідність правильного його налаштування. Щоби пропускати тільки задану частоту генерованого сигналу, необхідно використовувати смуговий фільтр **Bandpass**, задавши верхню і нижню частоти зрізу таким чином, щоб не спотворювалась форма корисного сигналу. Наприклад, для сигналу частотою 1000 Гц можна встановити нижню частоту зрізу 900 Гц, а верхню –

1100 Гц. Порядок фільтру визначає крутизну спаду його характеристики; у цій роботі достатньо використовувати фільтр 4 порядку.

Також із вкладки **Express** → **Signal Analysis** панелі **Functions** додати блок **Spectral Measurements** для візуалізації спектру сигналу. Передбачити можливість керування підсиленням амплітуди прийнятого сигналу. На рис. 2.8 зображено блок-діаграму розроблюваного віртуального приладу, а на рис. 2.9 – лицьову панель.

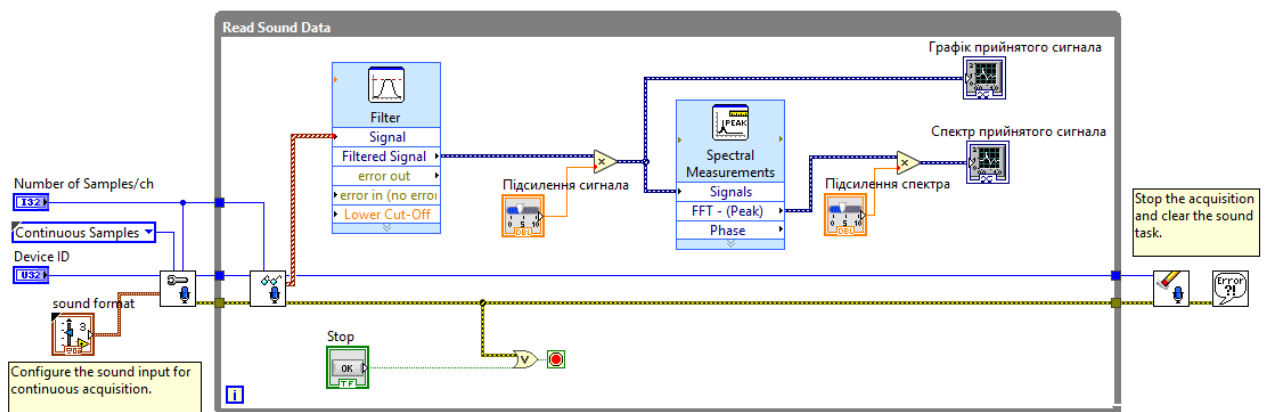


Рис. 2.8. Блок-діаграма розроблюваного віртуального приладу

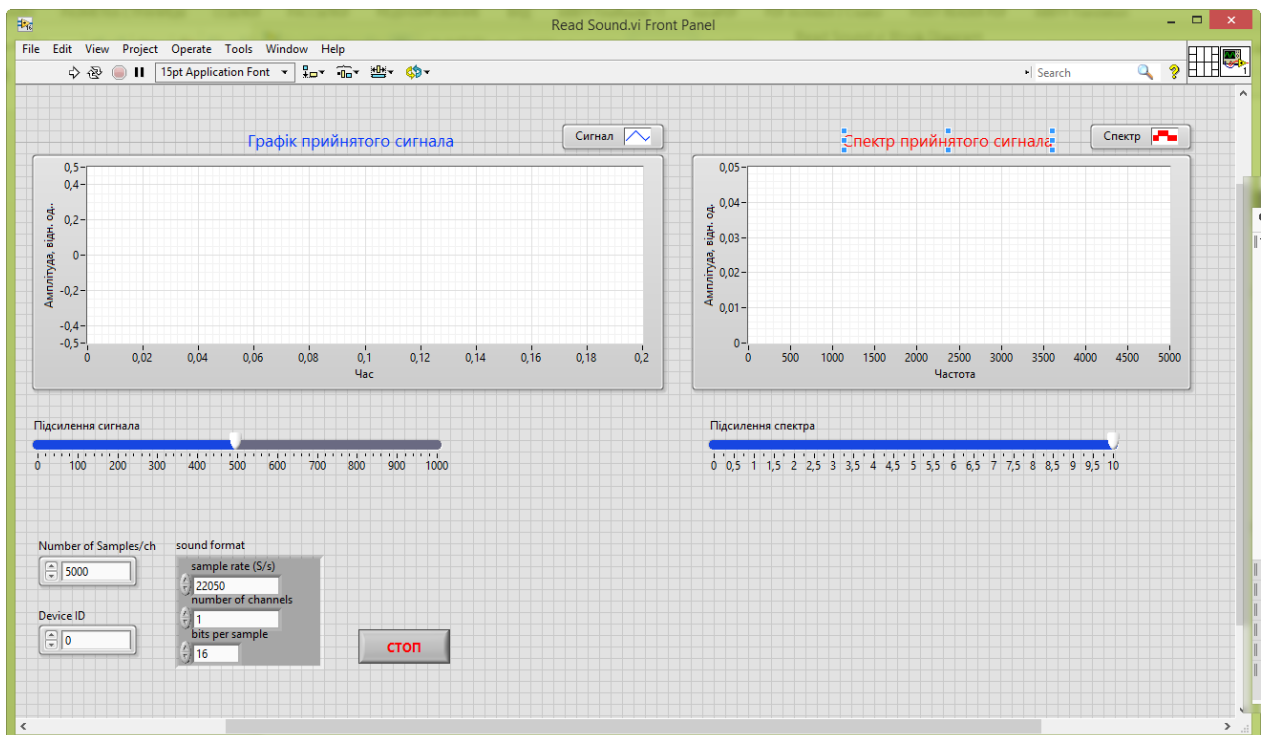


Рис. 2.9. Лицьова панель розроблюваного віртуального приладу

Відкрити властивості кожного графічного вікна і активувати наступні елементи: **Graph Palette** та **Cursor Legend**. Після встановлення елементу **Cursor Legend** викликати його властивості і створити новий курсор.

Запустити заздалегідь встановлену програму для генерації сигналів на вашому смартфоні і встановити частоту сигналу 1000 Гц. Запустити на комп'ютері розроблений віртуальний прилад і подивитись, чи приймається мікрофоном збуджуваний гармонійний сигнал.

Модифікувати програму таким чином, щоб можна було автоматично визначати амплітуду сигналу. Для цього встановити блок розрахунку параметрів сигналів **Tone Measurements**, який знаходиться у вкладці **Express** → **Signal Analysis** панелі **Functions**. Відкрити вікно властивостей блоку і обрати для відображення амплітуду. Додати на виході блоку індикатор для відображення розрахованої амплітуди сигналу. У такому випадку амплітуда буде розраховуватись на кожній ітерації циклу і відображатись у вигляді числа. Для спостереження зміни амплітуди зручно користуватись графічною інтерпретацією результатів вимірювань, тому модифікувати програму таким чином, щоби додатково виводився графік зміни амплітуди. Для цього використовувати блок **Waveform Chart**.

Переміщенням поршня знайти **найменшу** відстань L_1 між динаміком та поршнем, при якій стовп повітря в трубці резонував би на даній частоті коливань (звук при цьому підсилиться). Це буде відповідати нерухомій хвилі, що встановилася. У цьому випадку біля відкритого кінця трубки утворюється пучність. Підсилення звуку визначати за допомогою мікрофону, що встановлюється біля верхнього краю трубки, та розробленого віртуального приладу за максимумом амплітуди.

Значення відстані L_1 занести у таблицю 2.1. Збільшуючи відстань між динаміком та поршнем знайти наступну найближчу відстань L_2 , при якій

утворюється пучність у відкритого кінця трубки. Після чого знайти довжину нерухомої хвилі як різницю $L_2 - L_1$.

На основі виміряного значення довжини нерухомої хвилі розрахувати довжину хвилі, що біжить λ .

Аналогічні досліди та розрахунки виконати для частот 2000 і 5000 Гц.

Знайти середню швидкість звуку за результатами усіх дослідів. Після чого за формулою (2.1) визначити температуру T , при якій здійснювалися досліди.

2.4. Оформлення експериментальних результатів

Результати вимірювань занести у таблицю 2.1.

Табл. 2.1. Результати дослідів

№ досліду	Відстані до пучності нерухомої хвилі, мм		Довжина нерухомої хвилі l , м	Довжина хвилі λ , м	Частота коливань f , Гц	Швидкість звуку C , м/с
	L_1	L_2				
1					1000	
2					2000	
3					5000	

2.5. Контрольні запитання

1. Поясніть, що таке нерухома хвиля і яким чином вона утворюється?
2. Поясніть, що таке вузли і пучності нерухомої хвилі?
3. Поясніть, яким є характер віддзеркалення хвилі від більш щільного середовища та від менш щільного?
4. Що таке резонанс акустичної хвилі?
5. Поясніть, яким чином швидкості поширення хвилі у повітрі залежить від температури повітря?

6. Опишіть процес створення програми у середовищі NI LabView для цієї лабораторної роботи. Поясніть призначення основних блоків програми.

Список використаних джерел для лабораторної роботи №2

1. Чепуренко В.Г. Руководство к лабораторным работам по физике / В.Г. Чепуренко. – К.: Издательство киевского Университета, 1963. – 312 с.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1970. – 508 с.

3. Федосов В.П. Цифровая обработка сигналов в LabView: учеб. пособие / В.П. Федосов, А.К. Нестеренко. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.

4. Евдокимов Ю.К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

5. Ануфриев И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

6. Галилео. Эксперимент. Стоячая волна [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.youtube.com/watch?v=Nv_Bh6ihYHg

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ДОДАВАННЯ ДВОХ ВЗАЄМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНИХ ГАРМОНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІГУР ЛІССАЖУ

Мета роботи: дослідити явище додавання двох взаємно перпендикулярних гармонійних коливань; розробити віртуальний прилад в середовищі LabView для виведення двох гармонійних коливань через звукову карту комп'ютера.

3.1. Основні положення

Найпростіші коливання тіла – це коливання, при яких відхилення x тіла від положення рівноваги змінюється за гармонійним законом:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi),$$

де A – амплітуда, ω – частота, φ – початкова фаза коливань.

Під час додавання двох гармонійних коливань у двох взаємно перпендикулярних напрямках утворюються замкнуті траєкторії результуючих коливань, які отримали назву фігури Ліссажу (названі на честь французького вченого Жюля Антуана Ліссажу, який вперше їх вивчив). Вид фігур залежить від співвідношення між періодами (частотами), фазами та амплітудами обох коливань.

Математичний вираз для кривої Ліссажу записується наступним чином:

$$\begin{cases} x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \\ y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (3.1)$$

Вид кривої сильно залежить від співвідношення циклічних частот ω_1/ω_2 . Коли співвідношення частот дорівнює 1, фігура Ліссажу має вигляд еліпса, а за певних умов вона може мати вигляд кола (при $A_1=A_2$, $\varphi_1-\varphi_2=\pi/2$) або відрізка

прямої ($\varphi_1 - \varphi_2 = 0$). Ще один приклад фігури Ліссажу – парабола ($\omega_1/\omega_2 = 0,5$, $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$). При інших співвідношеннях параметрів фігури Ліссажу являють собою більш складні фігури, які стають замкнутими за умови, що співвідношення ω_1/ω_2 є раціональним числом.

Розглянемо докладніше, яким чином виникають деякі із фігур Ліссажу. Припустимо для простоти, що $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ та $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Тоді:

$$\begin{cases} x = A_1 \sin \omega t \\ y = A_2 \sin \omega t \end{cases} \quad (3.2)$$

Це означає, що $y = \frac{A_2}{A_1} x$, а отже, система рівнянь (3.2) описує відрізок прямої. Кут нахилу α до осі X визначається рівнянням:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_2}{A_1}$$

Тепер розглянемо випадок, коли $\varphi_1 = \varphi'_1 - \frac{\pi}{2}$. Тоді

$$x = A_1 \sin \left(\omega_1 t + \varphi'_1 - \frac{\pi}{2} \right) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi'_1)$$

і вираз для кривої Ліссажу (3.1) буде описуватись наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} x = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi'_1) \\ y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (3.3)$$

У випадку, коли $A_1 = A_2$, $\varphi'_1 = \varphi_2 = 0$ та $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} x = A \cos \omega t \\ y = A \sin \omega t \end{cases} \quad (3.4)$$

Точка з координатами x та y , що визначаються цими рівняннями, описує коло радіуса A . Дійсно, $x^2 + y^2 = A^2 \cos^2 \omega t + A^2 \sin^2 \omega t = A^2$. А це і означає, що траєкторією руху є коло.

Якщо ж $A_1 \neq A_2$, $\varphi'_1 = \varphi_2 = 0$, $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то система рівнянь (3.3) описуватиме еліпс. На рис. 3.1а показано еліпс у випадку, коли $A_1=1$ та $A_2=2$ (тобто еліпс витягнутий по осі Y), а на рис. 3.1б – еліпс при $A_1=2$ та $A_2=1$ (тобто витягнутий по осі X).

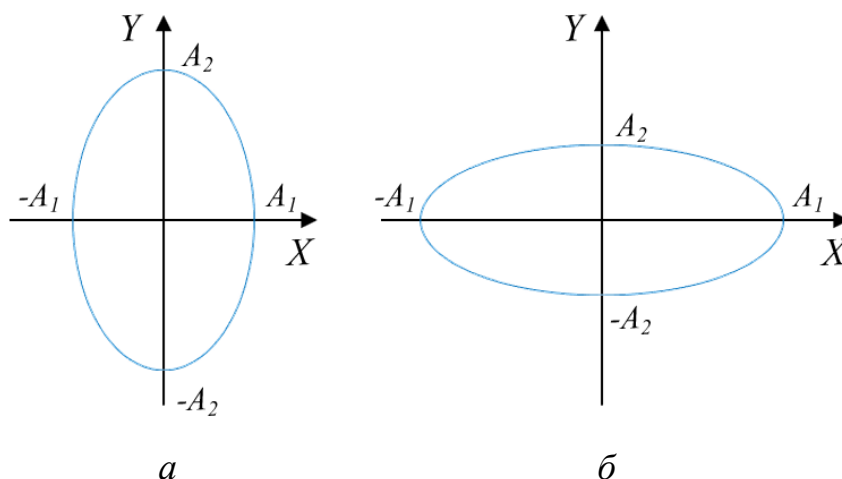


Рис. 3.1. Графіки траєкторії руху: *a* – випадок, коли $A_1=1$, $A_2=2$;
б – випадок, коли $A_1=2$, $A_2=1$

Те, що система рівнянь (3.3) при $A_1 \neq A_2$ описує еліпс можна також показати аналітично:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = \cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t - 1$$

Тобто, точка з координатами x та y лежить на еліпсі. Очевидно, що змінюючи співвідношення амплітуд, можна одержати різні еліпси.

Розглянемо тепер вплив частот на форму траєкторії, вважаючи, що амплітуди обох коливань є однаковими.

Для прикладу побудуємо криві, що відповідають рівнянням:

$$\begin{cases} x = A \cos \omega t \\ y = A \sin 2\omega t \end{cases} \quad (3.5)$$

та

$$\begin{cases} x = A \cos \omega t \\ y = A \sin 4\omega t \end{cases} \quad (3.6)$$

Побудови можна виконати наступним чином. Візьмемо коло радіусом A (див. рис. 3.2), відмітимо на ньому точки, що відповідають кутам ωt , які дорівнюють $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8, \pi \dots 2\pi$. Щоб знайти точки з координатами $x = A \cos \omega t$ та $y = A \sin 2\omega t$ згадаємо, що у випадку кола одиничного радіусу ($r=1$) величина $\cos \omega t$ чисельно дорівнює проекції радіус-вектора $r(\omega t)$ на вісь X , а величина $\sin \omega t$ – проекції на вісь Y . Оскільки ми взяли коло радіуса A , то координати x та y кожної точки кола – це проекція радіус-векторів цих точок на осі X та Y . Коли усі точки за їхніми координатами відомі, то через ці точки можна провести суцільну лінію (рис. 3.2).

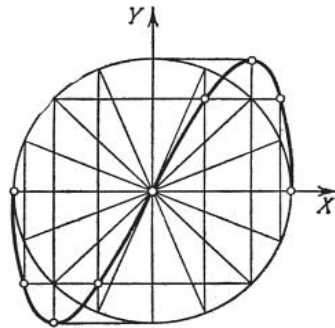


Рис. 3.2. Принцип побудови кривих, що описуються системою рівнянь (3.5) та (3.6)

Для обох систем рівнянь (3.5) та (3.6) одержуємо замкнуті криві, число петель яких відповідає співвідношенню $n=\omega_2/\omega_1$ (рис. 3.3).

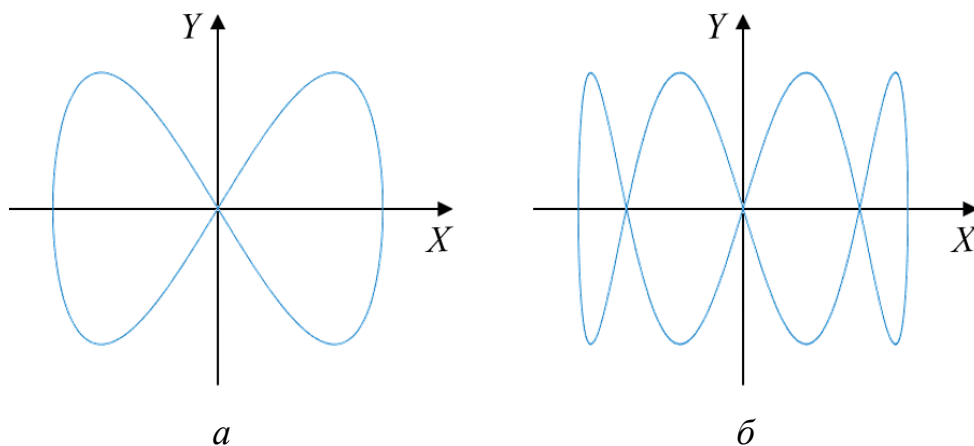


Рис. 3.3. Результуючі криві, що описуються:

a – системою рівнянь (3.5); $б$ – системою рівнянь (3.6)

Однак фігури Ліссажу не завжди бувають замкненими. На рис. 3.4 приведена фігура Ліссажу, яка є незамкненою. Вона відповідає системі рівнянь:

$$\begin{cases} x = A \cos 2\omega t \\ y = A \sin 3\omega t \end{cases} \quad (3.7)$$

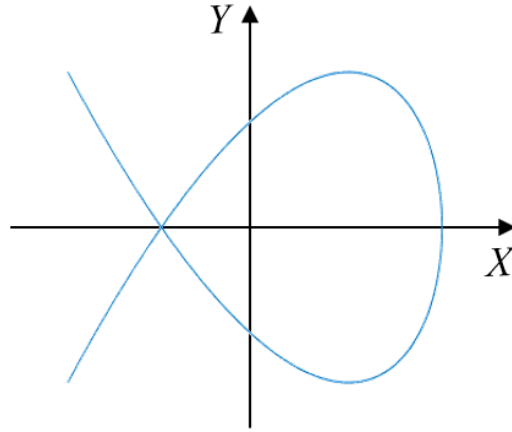


Рис. 3.4. Фігура Ліссажу, що відповідає системі рівнянь (3.7)

Розглянемо умови, за яких виникають незамкнені фігури Ліссажу, використовуючи для прикладу наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} x = A_1 \cos p\omega t \\ y = A_2 \sin q\omega t \end{cases}$$

Можна відмітити, що у точці, де крива повертається назад за тією ж траєкторією (див. рис. 3.4), швидкості тіла вздовж осі X та Y одночасно обертаються в нуль. Саме у цьому випадку тіло, яке рухається вздовж кривої, зупиняється, а потім починає знову рухатись. Якщо $x = A_1 \cos p\omega t$, то

$$v_x = \frac{A_1 \cos p\omega t_2 - A_1 \cos p\omega t_1}{t_2 - t_1} = \frac{-2A_1 \sin \frac{p\omega t_2 + p\omega t_1}{2} \sin \frac{p\omega t_2 - p\omega t_1}{2}}{t_2 - t_1}$$

При $t_2 \approx t_1 = t$ (тобто, різниця $t_2 - t_1$ мала), отримуємо наступне спрощення:

$$\sin \frac{p\omega t_2 + p\omega t_1}{2} \approx \frac{p\omega t_2 + p\omega t_1}{2}.$$

У результаті отримуємо, що $v_x = -A_1 p \omega \sin \omega t$.

Аналогічно для v_y отримаємо $v_y = A_2 q \omega \cos q\omega t$.

Швидкість v_x обертається в нуль ($v_x=0$) за умови $p\omega t = k\pi$, а швидкість $v_y=0$, якщо $q\omega t = \frac{\pi}{2} + m\pi$. Із цих умов випливає, що фігура Ліссажу виявляється незамкнутою у тих випадках, коли

$$\frac{p}{q} = \frac{2k}{2m+1} \quad (3.8)$$

Крива на рис. 3.4 задовольняє умові (3.8).

Фігури Ліссажу зручно спостерігати на екрані осцилографа. При цьому на вертикальну розгортку подається одне гармонійне коливання, на горизонтальну – інше.

На рис. 3.5 показано вигляд деяких фігур Ліссажу за різних співвідношень частот і різниць фаз.

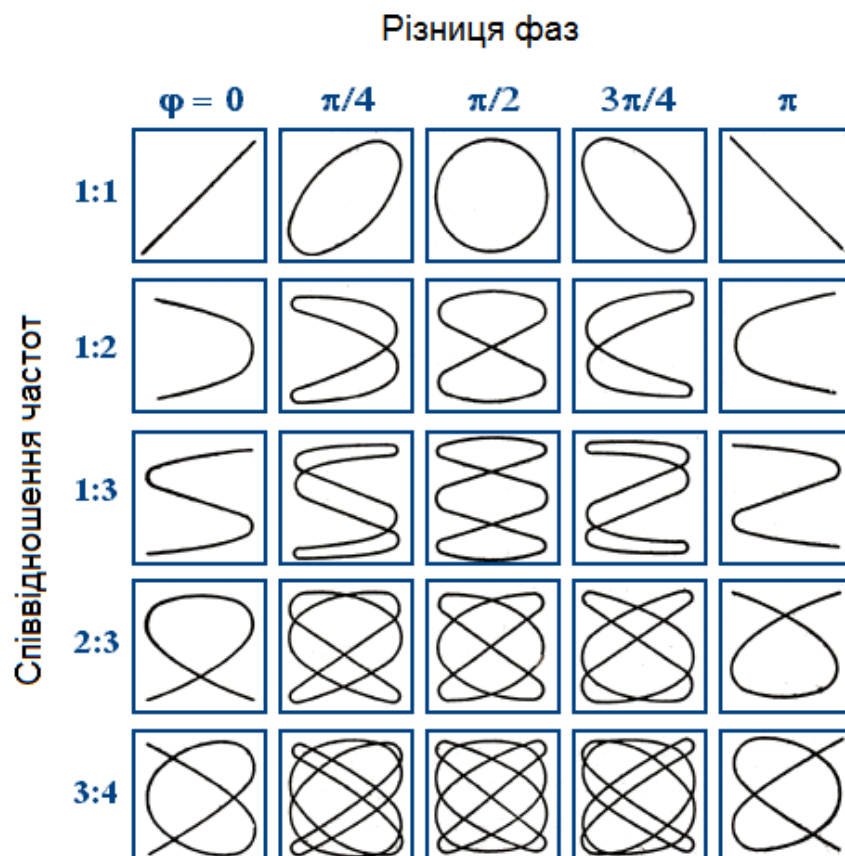
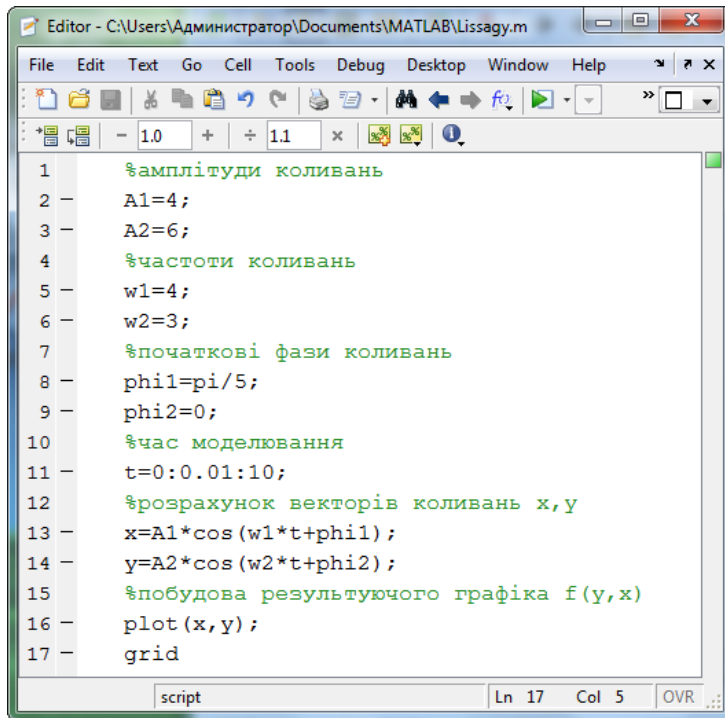


Рис. 3.5. Вигляд фігур Ліссажу за різних співвідношень частот та різниць фаз

3.2. Експериментальна частина

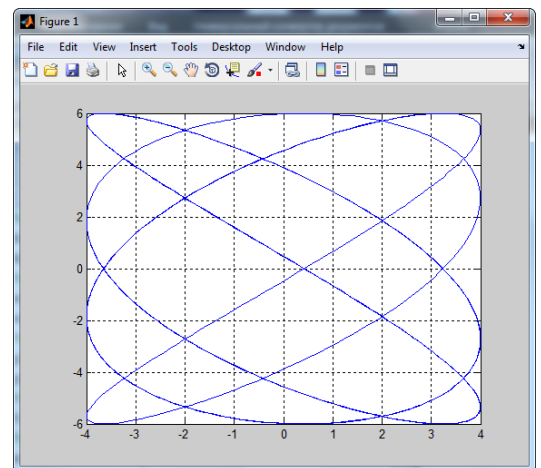
Отримати у викладача спеціалізовані комп'ютерні програми, які візуалізують фігури Ліссажу. Запустити та ознайомитись з роботою цих програм.

Написати власну програму для виведення графіку фігур Ліссажу в середовищі MATLAB. Приклад коду наведено на рис. 3.6а.



```
1  %амплітуди коливань
2  A1=4;
3  A2=6;
4  %частоти коливань
5  w1=4;
6  w2=3;
7  %початкові фази коливань
8  phi1=pi/5;
9  phi2=0;
10 %час моделювання
11 t=0:0.01:10;
12 %розрахунок векторів коливань x,y
13 x=A1*cos(w1*t+phi1);
14 y=A2*cos(w2*t+phi2);
15 %побудова результуючого графіка f(y,x)
16 plot(x,y);
17 grid
```

а



б

Рис. 3.6. Програма для візуалізації фігур Ліссажу в MATLAB:

а – код; б – побудований графік

Після написання програми у середовищі MATLAB створити програму в LabView, за допомогою якої можна генерувати звук через аудіовихід звукової карти комп'ютера.

Запустити програму LabView. Виконати команду **File** → **New VI**. На пустій заготовці лицьової панелі (**Front panel**) нового віртуального приладу натиснути праву кнопку мишки, після чого у спливаючому вікні **Controls** вибрати вкладку **Modern** → **Graph**, з якої на лицьову панель перетягнути елемент **Ex XY Graph**.

Далі перейти у вікно **Block Diagram**, де натиснути праву кнопку мишки на піктограмі **Build XY Graph**. У спливаючому меню вибрати **Examples**, після чого з'явиться нове вікно **LabVIEW Help**. У полі **Build XY Graph Express VI** натиснути **Open Example** (рис. 3.7). У результаті відкриється приклад програми для побудови фігур Ліссажу за назвою **Lissajous with Express Vis**. Ознайомитись із його роботою, змінюючи доступні параметри на лицьовій панелі.

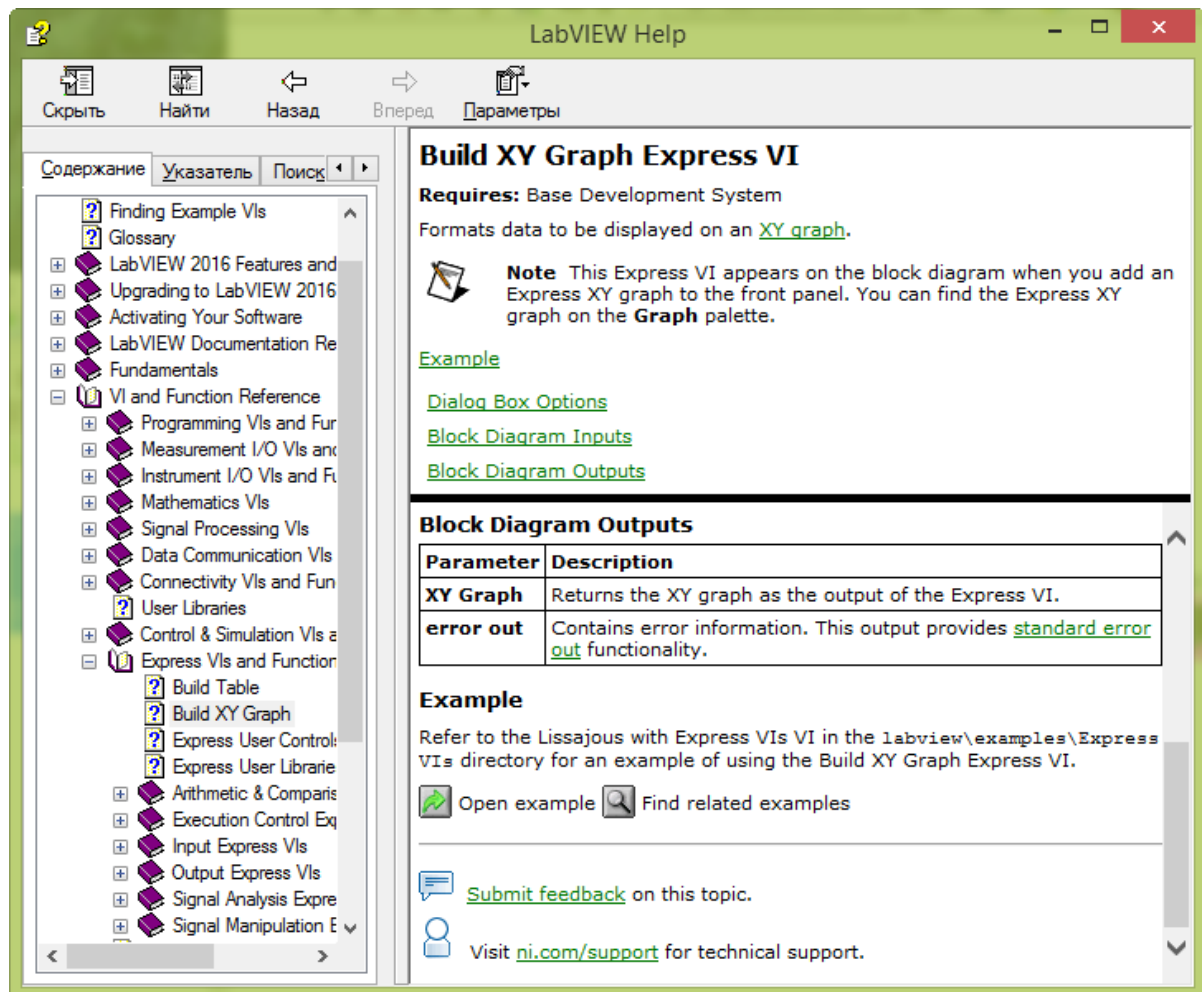


Рис. 3.7. Вікно довідки блока Build XY Graph Express VI

Після ознайомлення із прикладом віртуального приладу **Lissajous with Express Vis** його можна закрити і перейти до наступної частини завдання.

Розробити віртуальний прилад в середовищі LabView, за допомогою якого виводити гармонійні коливання заданої частоти окремо на лівий та правий канали аудіовиходу звукової карти.

Із головного вікна LabView спочатку виконати команду **Help** → **Find Examples**. За допомогою інструментів пошуку знайти приклад **Generate Sound.vi**. Відкрити його блок-діаграму (рис. 3.8) і скопіювати усі дані у новий проєкт. Після чого можна закрити приклад **Generate Sound.vi**, тому що надалі вся робота і внесення змін відбуватимуться в новому проєкті.

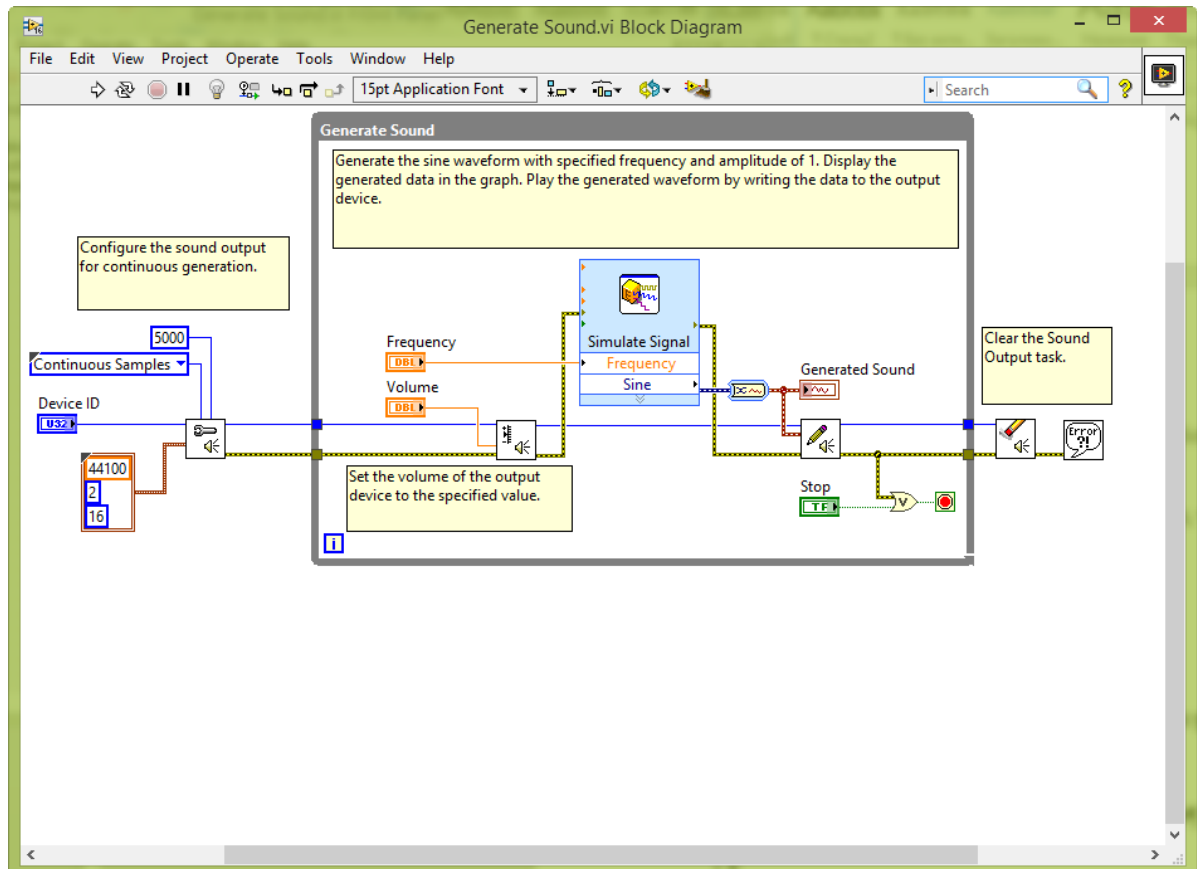


Рис. 3.8. Блок-діаграма Generate Sound.vi

Запустити програму на виконання і перевірити, чи генерується звук через колонки, які повинні бути заздалегідь підключені до комп'ютера.

Модифікувати програму, встановивши другий блок **Simulate Signal** та блок **Build Array** (рис. 3.9), який дозволяє розділити генеровані сигнали для окремого виведення по правому і лівому каналах аудіовиходу звукової карти. Також встановити елементи керування амплітудою та фазою кожного сигналу.

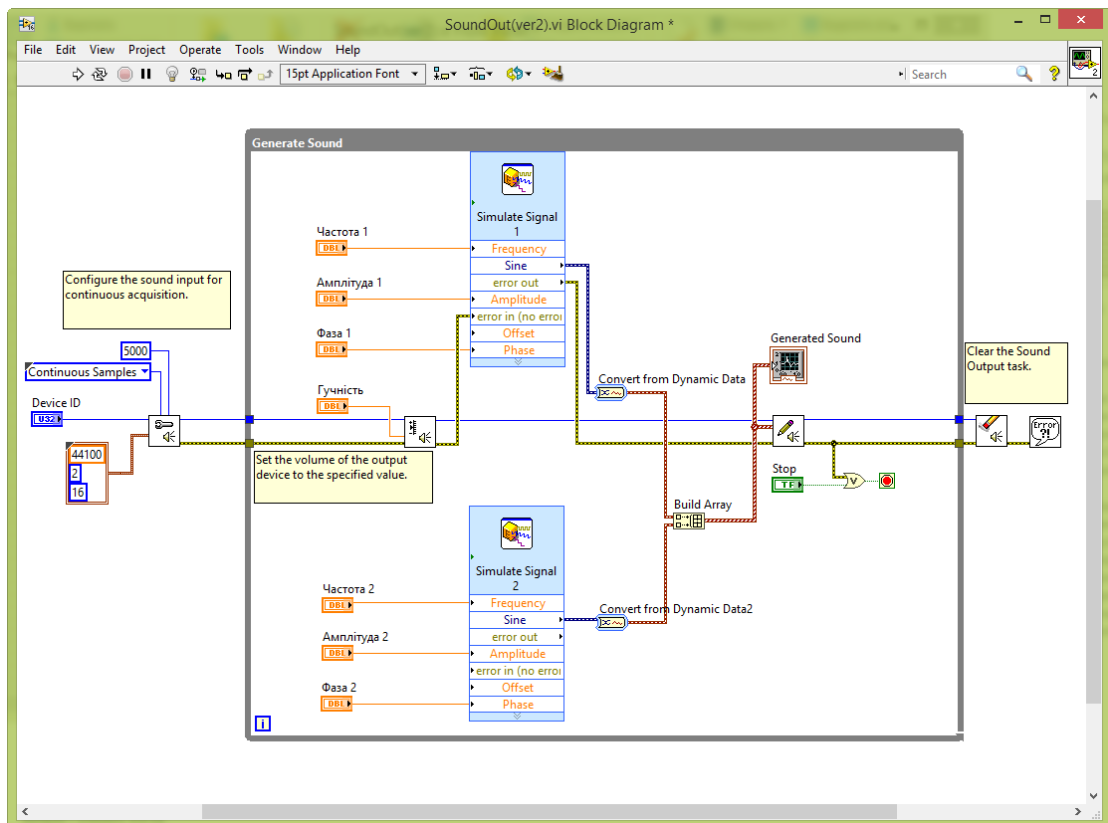


Рис. 3.9. Блок-діаграма розробленого віртуального приладу

Лицьова панель повинна містити елементи, представлені на рис. 3.10.

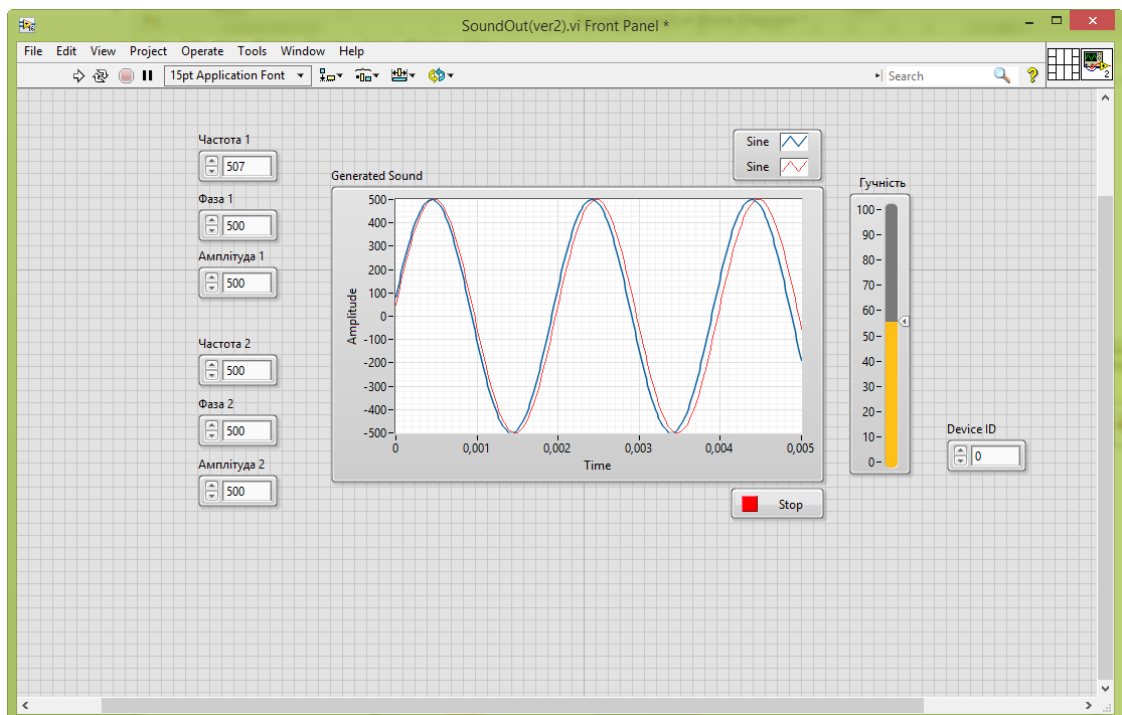


Рис. 3.10. Лицьова панель розробленого віртуального приладу

Модифікувати схему таким чином, щоб була можливість на лицьовій панелі розробленого віртуального приладу спостерігати фігури Ліссажу. Для цього використовувати блок **XY Graph**, що знаходиться у палітрі компонентів **Modern** → **Graph**.

Використовуючи спеціальний кабель, який можна отримати у викладача, підключити вихід звукової карти комп'ютера до двох входів осцилографа. Налаштувати осцилограф згідно його інструкції з експлуатації для виведення фігур Ліссажу.

Згідно таблиці 3.1 встановлювати почергово задані співвідношення частот та фаз між двома каналами. Отримані на екрані осцилографа фігури сфотографувати за допомогою смартфона (або іншого пристрою).

Для встановлення фази в розробленому віртуальному приладі необхідно змінювати фазу тільки в першому блоці **Simulate Signal**, тоді як в другому фаза залишатиметься рівною 0. Щоб встановити значення фази, необхідно зупинити роботу програми, вводити потрібне значення фази в градусах, після чого по новому запускати програму на виконання (інакше фаза буде відображатись в полі введення блоку **Control**, але не буде встановлена до перезапуску програми).

3.3. Оформлення експериментальних результатів

Зроблені фотографії фігур Ліссажу додати у відповідні комірки таблиці 3.1.

Табл. 3.1. Результати експериментальних досліджень

Співвідно- шення частот	Різниця фаз				
	0°	45°	90°	135°	180°
1:1					
1:2					
1:3					
2:3					

3.4. Контрольні запитання

1. Які криві називаються фігурами Ліссажу?
2. Поясніть, якою системою рівнянь описується траєкторія руху тіла в тому випадку, коли воно одночасно бере участь у двох взаємно перпендикулярних коливаннях?
3. Поясніть, за яких умов фігури Ліссажу виявляються незамкнутими?
4. Опишіть, як за допомогою осцилографа можна спостерігати фігури Ліссажу? Які вимоги висуваються до осцилографа?
5. Опишіть процес створення програми у середовищі NI LabView для цієї лабораторної роботи. Поясніть призначення основних блоків програми.
6. Поясніть, що таке параметр Number of samples, який використовується у блоці налаштування звукової карти, і на що впливає цей параметр.

Список використаних джерел для лабораторної роботи №3

1. Кикоин И. К. Опыты в домашней лаборатории / И.К. Кикоин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 144 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1970. – 508 с.
3. Федосов В.П. Цифровая обработка сигналов в LabView: учеб. пособие / В.П. Федосов, А.К. Нестеренко– М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
4. Евдокимов Ю.К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю.К. Евдокимов, В.Р. Линдваль, Г.И. Щербаков. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.
5. Ануфриев И.Е. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУНА-ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ

Мета роботи: ознайомитись з ультразвуковим луна-імпульсним методом вимірювання відстані; вивчити схемотехнічні особливості плати Arduino Uno та навчитись її програмувати; набути навички складання макету акустичного радару та аналізу отриманих за його допомогою даних.

4.1. Основні положення

4.1.1. Ультразвуковий луна-імпульсний метод

Ультразвуковий луна-імпульсний метод заснований на вимірюванні часу проходження випроміненого імпульсу у прямому (від перетворювача до перешкоди) та зворотному (від перешкоди до перетворювача) напрямках. Відстань визначається за наступною формулою:

$$H = \frac{CT}{2}$$

де C – швидкість поширення ультразвукових хвиль в середовищі, T – часовий інтервал між випроміненим та прийнятим імпульсами.

Ультразвуковий луна-імпульсний метод застосовується в ультразвукових далекомірах. На відміну від інфрачервоних далекомірів, на результати вимірювання ультразвукового далекоміра не впливають засвічення від сонця або колір об'єкта. Також навіть прозора поверхня буде для нього перешкодою, тоді як для інфрачервоного від такої поверхні випромінений сигнал може не повернутись. З іншого боку, ультразвуковий сигнал погано віддзеркалюється від сильно розсіювальних (наприклад, пухнастих) або поглинаючих поверхонь.

4.1.2. Ультразвуковий роздільно-суміщений перетворювач

Найчастіше далекоміри працюють на основі роздільно-суміщеної схеми, у якій використовуються два перетворювача (один є випромінювачем, а інший – приймачем), що знаходяться в одному корпусі. Принцип роботи вимірювання відстані із використанням роздільно-суміщеного схеми представлено на рис. 4.1.

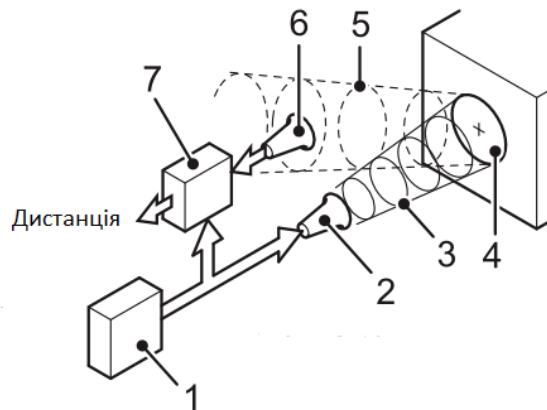


Рис. 4.1. Принцип роботи ультразвукового роздільно-суміщеного перетворювача: 1 – генератор; 2 – ультразвуковий випромінювач; 3 – ультразвукові імпульси; 4 – віддзеркалююча поверхня; 5 - віддзеркалена хвиля; 6 – ультразвуковий приймач; 7 – блок розрахунку відстані

Ультразвукові далекоміри широко використовуються у робототехніці (рис. 4.2). За їх допомогою реалізують алгоритми огинання перешкод.

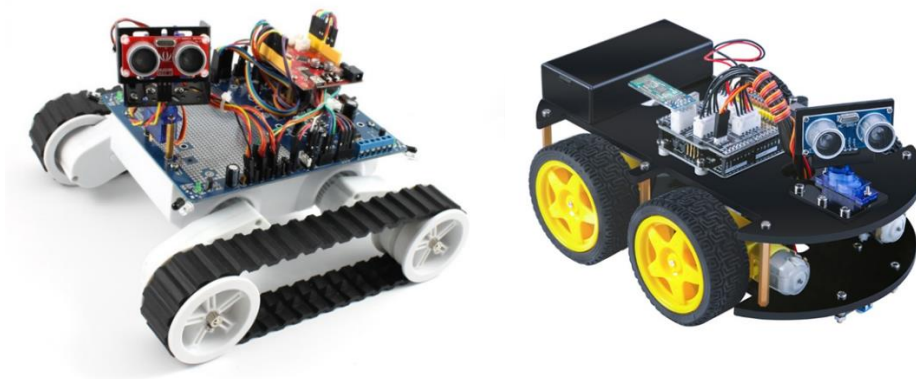


Рис. 4.2. Роботи-автомобілі із ультразвуковими далекомірами, які використовуються для орієнтування у просторі

4.1.3. Основи роботи із платою Arduino Uno та середовищем розробки програм Arduino IDE

Arduino – торгова марка апаратно-програмних засобів для побудови простих систем автоматики і робототехніки, що орієнтована на непрофесійних користувачів.

Апаратна частина являє собою набір змонтованих друкованих плат, що продаються як офіційним виробником, так і сторонніми виробниками. Основними платами Arduino є: Arduino Uno, Arduino Leonardo, Arduino Mega 2560, Arduino Nano, Arduino Mini, Arduino Ethernet тощо.

Програмна частина складається з безкоштовної програмної оболонки (Arduino IDE) для написання програм, їх компіляції та програмування апаратури (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Вікно Arduino IDE

Програми, що написані в Arduino IDE, називаються скетчами. Скетч складається з двох основних функцій: `void setup()` та `void loop()`. У першій функції записується те, що виконається лише один раз після запуску програми (зазвичай, тут виконують різні налаштування виводів плати). Друга функція виконується циклічно до тих пір, поки або не буде вимкнене живлення, або мікроконтролер не буде перепрошитий іншою програмою.

Перш ніж завантажити створений скетч у плату, її потрібно підключити до комп'ютера та виконати початкові налаштування середовища Arduino IDE: у меню **Інструменти** → **Плата** із випадаючого списку необхідно обрати саме ту плату, яка була підключена (рис. 4.4).

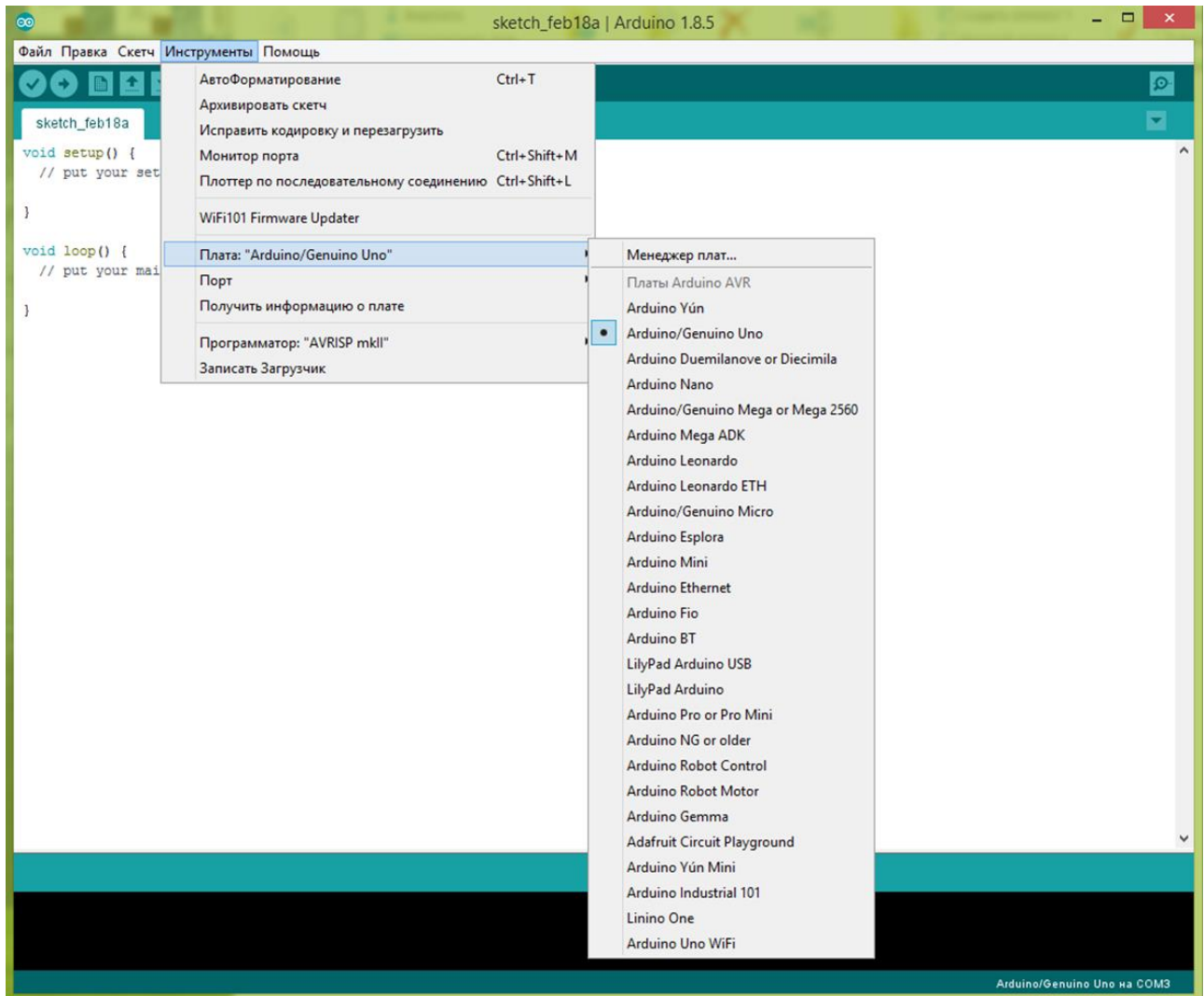


Рис. 4.4. Вибір плати, яка буде прошиватись розробленою програмою

Потім у меню **Інструменти** → **Порт** вибираємо той віртуальний COM-порт, до якого підключено плату Arduino (рис. 4.5).

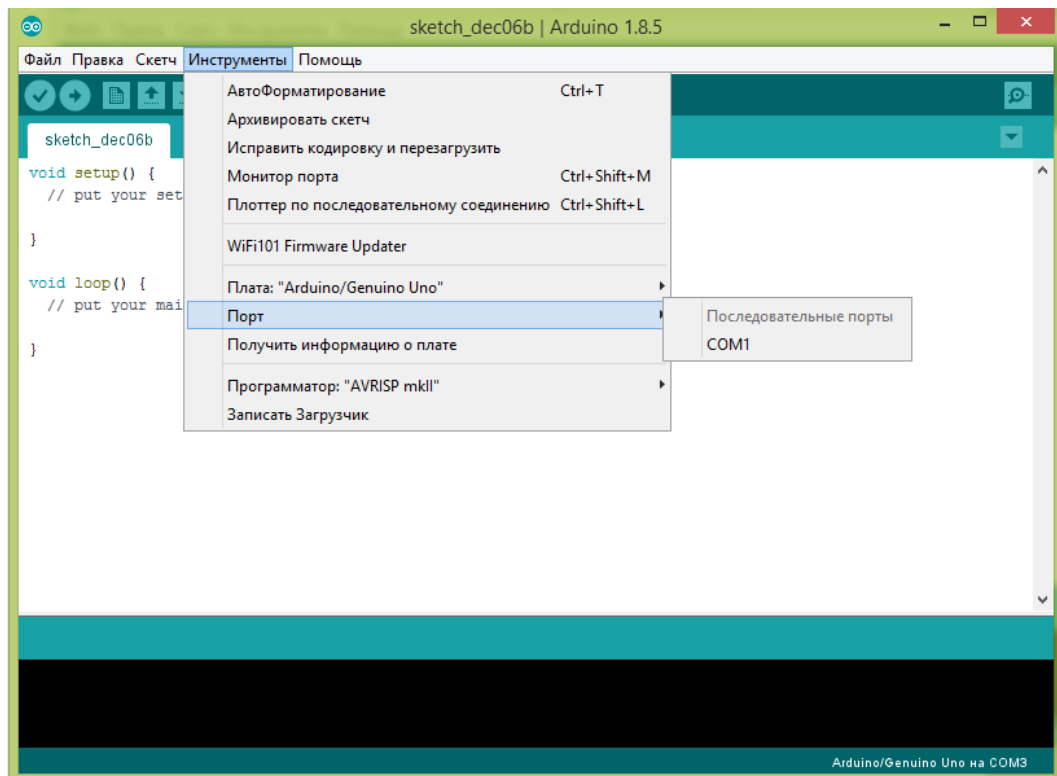



Рис. 4.5. Вибір порта, до якого підключена плата Arduino

Щоб завантажити програму, яка написана в Arduino IDE, у мікроконтролер, необхідно натиснути кнопку .

4.2. Опис макету акустичного радару

Основою акустичного радару є ультразвуковий далекомір, який встановлено на обертовий вал серводвигуна. Обертанням валу та обробкою сигналів від далекоміра керує мікроконтролер.

До складу використовуваного макету входять наступні компоненти:

- плата Arduino Uno з USB-кабелем для з'єднання із комп'ютером;
- серводвигун MG995;
- ультразвуковий датчик відстані HC-SR04;
- провідники;
- комп'ютер із встановленими програмами Arduino IDE та Processing.

- **4.2.1. Плата Arduino Uno**

В основі плати Arduino Uno (рис. 4.6) лежить мікроконтролер ATmega328P, який має тактову частоту 16 МГц, flash-пам'ять об'ємом 32 кБ, оперативну пам'ять об'ємом 2 кБ, EEPROM об'ємом 1 кБ.



Рис. 4.6. Зовнішній вигляд плати Arduino Uno

- **4.2.2. Провідники**

Для з'єднання електронних компонентів між собою у макеті акустичного радару використовуються проводи типу «тато-тато» та «тато-мама» (рис. 4.7).

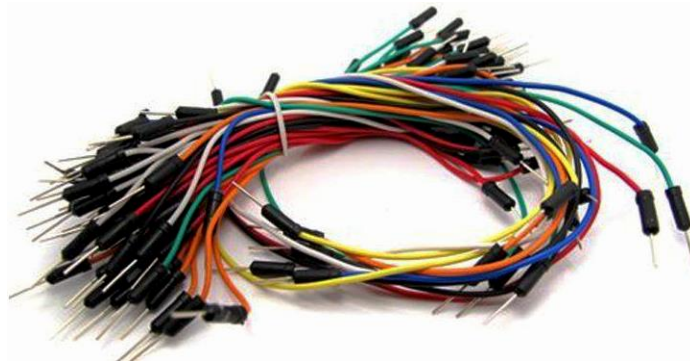


Рис. 4.7. Проводи, що використовуються для з'єднання

- **4.2.3. Сервопривід MG995**

Сервопривід – це механічний привід з управлінням через від'ємний зворотний зв'язок, що дозволяє точно керувати параметрами руху. Конструкція

сервоприводу складається з двигуна, датчика позиціонування і керуючої системи.

Серводвигун MG995 (рис. 4.8) поставляється з проводом довжиною 30 см і 3-ма 'S' контактами типу мама. Вихідний вал сервоприводу повертається приблизно на 120-140 градусів (60-70 градусів в кожному напрямку). Діапазон робочих напруг: 4,8-7,2 В. Може споживати струм силою до 0,3 А.

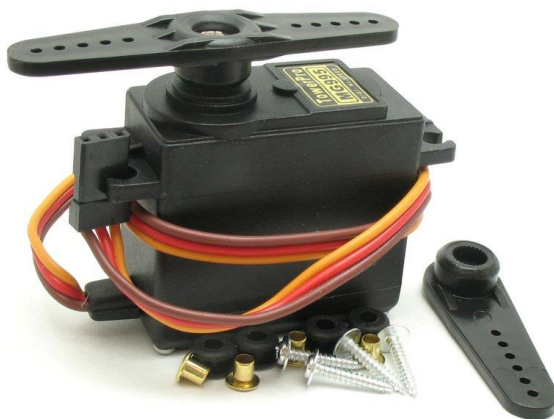


Рис 4.8. Сервопривід MG995

Важливо! Для серводвигуна необхідно використовувати зовнішнє джерело живлення, проте у випадку не сильного навантаження можна використовувати живлення від плати Arduino Uno.

• 4.2.4. Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04

Ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 (рис. 4.9) призначений для вимірювання відстаней від 2 до 400 см, причому межа точності може досягати до 3 мм. Модуль включає ультразвуковий передавач, приймач і вузол контролю. На передній частині HC-SR04 розташовано два ультразвукових датчика, перший з написом T (Transmitter) – це випромінювач ультразвукових хвиль, а другий з написом R (Receive) – це приймач відбитих ультразвукових хвиль. На платі датчика також змонтована схема збудження випромінювача та схема попередньої обробки сигналів.

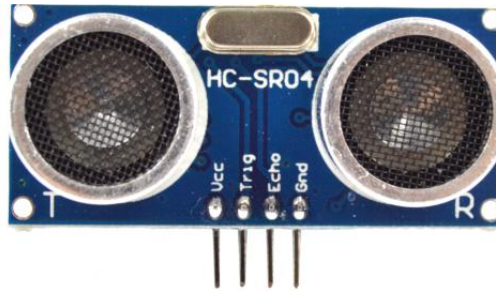


Рис. 4.9. Загальний вигляд модуля HC-SR04

Для того, щоб змонтувати датчик на валу сервоприводу, використовується спеціальний тримач (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Тримач для датчика HC-SR04

4.3. Написання програм для акустичного радару

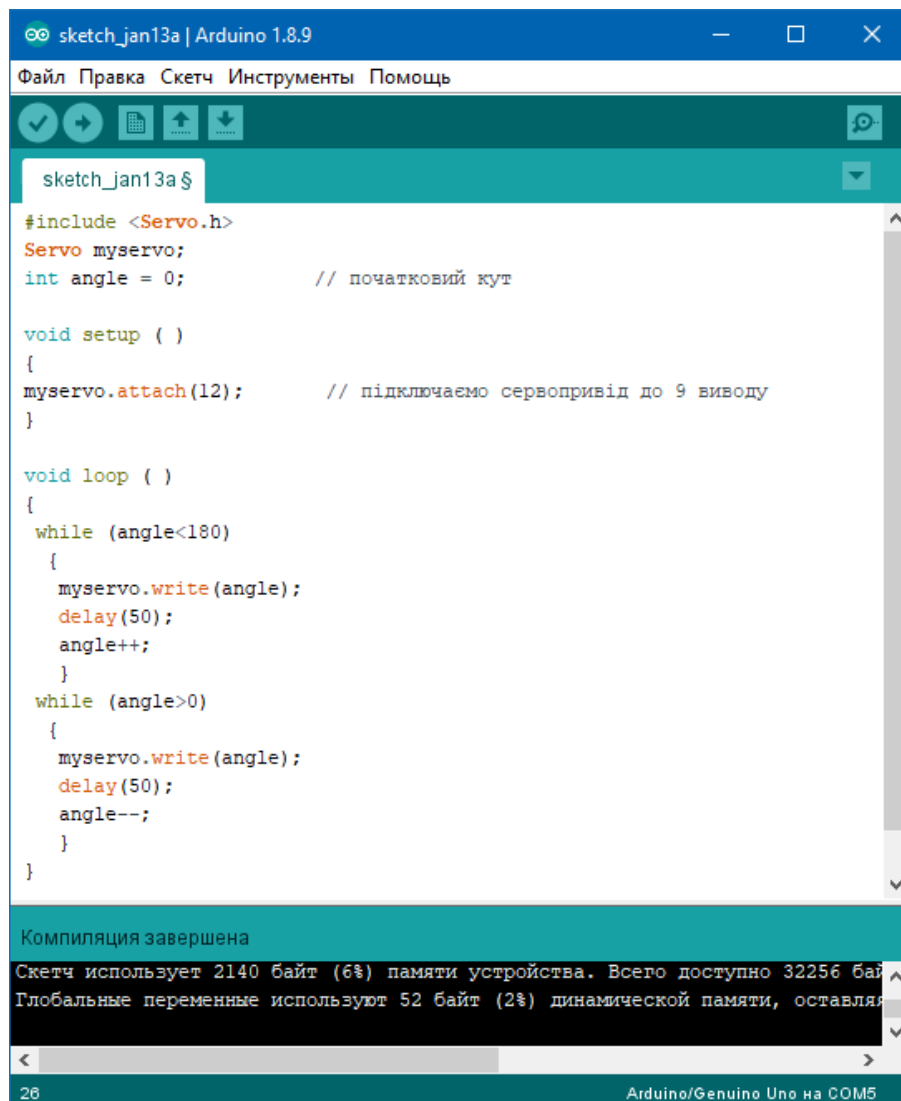
Для того, щоб реалізувати візуалізацію даних, отриманих від акустичного радару, потрібно написати окрему програму для Arduino Uno, яка повинна виконувати керування сервоприводом, ультразвуковим датчиком та передавати дані на комп'ютер через порт USB. Також повинна бути окремо написана програма, яка працюватиме на комп'ютері. Завданням цієї програми є зчитування даних від плати Arduino Uno та візуалізація отриманих результатів.

• 4.3.1. Написання скетчу для Arduino Uno

Мова програмування Arduino є стандартною мовою C++ (використовується компілятор AVR-GCC) з деякими особливостями, що полегшують написання власних програм.

У цьому розділі розглянемо лише основні функції, які можуть бути використані для створення програми керування акустичним радаром.

Для роботи із сервоприводом використовується стандартна бібліотека **Servo**, яка повинна бути підключена до програми за допомогою директиви **include**. Після підключення бібліотеки необхідно створити екземпляр класу **Servo** (наприклад, його можна назвати **myServo**). Далі потрібно у блоці **setup()** вказати вивід, до якого підключено сервопривід, для чого використовується метод **attach(pin_number)**. У основному блоці програми **loop()** для завдання потрібного кута повороту використовується метод **write(angle)**. Нижче наведено приклад коду, який дозволяє виконувати послідовне обертання вала серводвигуна за та проти годинниковою стрілкою у межах кутів від 0° до 180° (рис. 4.11).

The image is a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar at the top reads "sketch_jan13a | Arduino 1.8.9". Below the title bar is a menu bar with "Файл", "Правка", "Скетч", "Инструменты", and "Помощь". Under the "Скетч" menu, there are icons for saving, running, uploading, and downloading. The main text area contains the following C++ code:

```
#include <Servo.h>
Servo myservo;
int angle = 0;          // початковий кут

void setup ( )
{
  myservo.attach(12);    // підключаємо сервопривід до 9 виводу
}

void loop ( )
{
  while (angle<180)
  {
    myservo.write(angle);
    delay(50);
    angle++;
  }
  while (angle>0)
  {
    myservo.write(angle);
    delay(50);
    angle--;
  }
}
```

At the bottom of the IDE, there is a status bar that says "Компиляция завершена" (Compilation completed). Below that, a message box indicates memory usage: "Скетч использует 2140 байт (6%) памяти устройства. Всего доступно 32256 байт" and "Глобальные переменные используют 52 байт (2%) динамической памяти, оставляя...". The bottom status bar shows "26" and "Arduino/Genuino Uno на COM5".

Рис. 4.11. Скетч для обертання валом серводвигуна

Для того, щоб задати деяку затримку між переходом на наступне кутове положення у скетчі на рис. 4.11 була використана функція **delay()**, аргументом якої є число, що задає затримку у мілісекундах.

Тепер розглянемо, яким чином відбувається керування ультразвуковим датчиком. Датчик оснащений чотирма контактами (див. рис. 4.9): Vcc – вивід живлення (+5 В); Trig (T) – вивід сигналу запуску; Echo (R) – вивід для зчитування вимірюваного інтервалу часу; GND – вивід «Земля». Для підключення виводів Trig і Echo можна використовувати будь-які цифрові входи на Arduino. Для вимірювання відстані необхідно виконати таку послідовність дій:

1. Подати на вивід Trig імпульс тривалістю 10 мікросекунд.
2. В ультразвуковому далекомірі HC-SR04 відбудеться перетворення сигналу в 8 імпульсів з частотою 40 кГц, які випромінюються в повітря за допомогою випромінювача T (при цьому на виводі Echo з'явиться сигнал високого рівня).
3. Коли імпульси дійдуть до перешкоди, вони відіб'ються від неї і будуть прийняті приймачем R (при цьому на виводі Echo з'явиться сигнал низького рівня).
4. Таким чином ширина сформовано імпульсу на виводі Echo буде пропорційна подвоєному часу поширення ультразвукової хвилі від датчика до перешкоди. Тепер в самому мікроконтролері цей час за допомогою формул слід перевести у відстань.

Для визначення тривалості імпульсу використовується функція **pulseIn()**, що дозволяє виміряти тривалість імпульсу в мікросекундах.

Нижче на рис. 4.12 представлено скетч для зчитування даних із ультразвукового датчика та виведення результату вимірювань у монітор послідовного порта.

Зверніть увагу, що у цьому скетчі додатково були використані такі функції:

- **Serial.begin(speed)** – ініціює послідовне з'єднання і задає швидкість speed передачі даних (зазвичай для обміну даними використовується швидкість 9600 біт/с);
- **Serial.println(symbol)** – передає значення (тип char), що міститься в дужках, у послідовний порт з автоматичним переходом на новий рядок (**Serial.print()** – робить те саме, тільки без переходу на новий рядок);
- **pinMode(pin, inout)** – встановлює режим роботи заданого виводу мікроконтролера як входу (INPUT) або виходу (OUTPUT);
- **digitalWrite(pin, level)** – визначає номер виводу та рівень сигналу, який буде подано на цей вивід: 0 (LOW) або 5 (HIGH) Вольт;
- **delayMicroseconds(time)** – зупиняє виконання програми на задану в параметрі кількість мікросекунд.

```

int echoPin = 11, trigPin = 10;      // призначаємо ім'я для виводам 10 та 11
int duration;                        // призначаємо змінну для збереження тривалості імпульса
float distance;                      // призначаємо змінну для розрахунку відстані
void setup ()
{
  Serial.begin (9600);                // підключаємо монітор порта
  pinMode (trigPin, OUTPUT);          // призначаємо trigPin як вихід
  pinMode (echoPin, INPUT);           // призначаємо echoPin як вхід
}
void loop ()
{
  digitalWrite(trigPin,LOW);          // обнулення trigPin перед початком випромінювання
  delayMicroseconds (5);              // ставимо затримку в 5 мікросекунди
  // формуємо імпульс тривалістю 10 мкс для збудження випромінювача
  digitalWrite (trigPin,HIGH);        // формуємо сигнал високого рівня (початок імпульсу)
  delayMicroseconds(10);              // ставимо затримку в 10 мікросекунд
  digitalWrite(trigPin,LOW);          // встановлюємо низький рівень (кінець імпульсу)
  duration=pulseIn(echoPin,HIGH);      // зчитування тривалості імпульса
  distance=duration/58.8;              // обчислюємо відстань в сантиметрах
  Serial.print(distance);              // виводимо відстань в сантиметрах в монітор порта
  Serial.println("см");
  delay (1000);                      // затримка в 1 с перед наступним випромінюванням
}

```

Компіляція завершена

Скетч использует 3944 байт (12%) памяти устройства. Всего доступно 32256 байт.
Глобальные переменные используют 204 байт (9%) динамической памяти, оставляя 1844 байт для локальных

25 Arduino/Genuino Uno на COM5

Рис. 4.12. Скетч для вимірювання відстані

• 4.3.2. Програма для візуалізації даних на комп'ютері

У цій лабораторній роботі для візуалізації результатів вимірювань використовується середовище розробки програм Processing версії 3.36 – легкий і швидкий інструментарій для людей, які хочуть програмувати зображення, анімацію та інтерфейси. Processing може працювати у різних режимах програмування – це дозволяє програмувати на різних мовах, а також запускати скетчі на різних платформах. За замовчуванням стоїть режим Java.

Ми не будемо розглядати, як створити програму у Processing, а використовуватимемо уже написаний код.

Після запуску Processing необхідно вибрати потрібний файл із програмою, використовуючи меню **File** → **Open** (рис. 4.13).

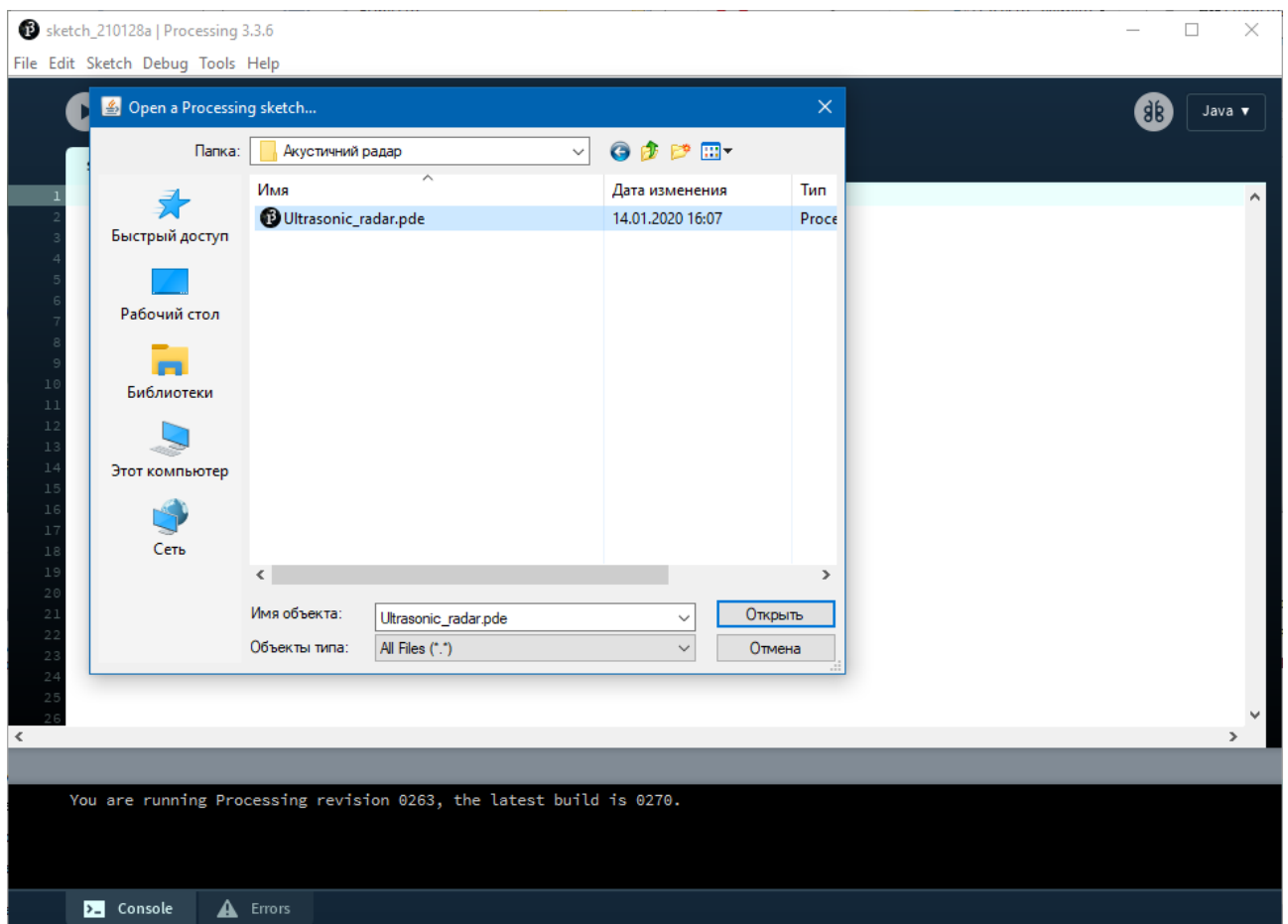


Рис. 4.13. Вибір файлу із програмою, що має розширення pde

У результаті у робочу область буде завантажено файл програми (рис. 4.14).

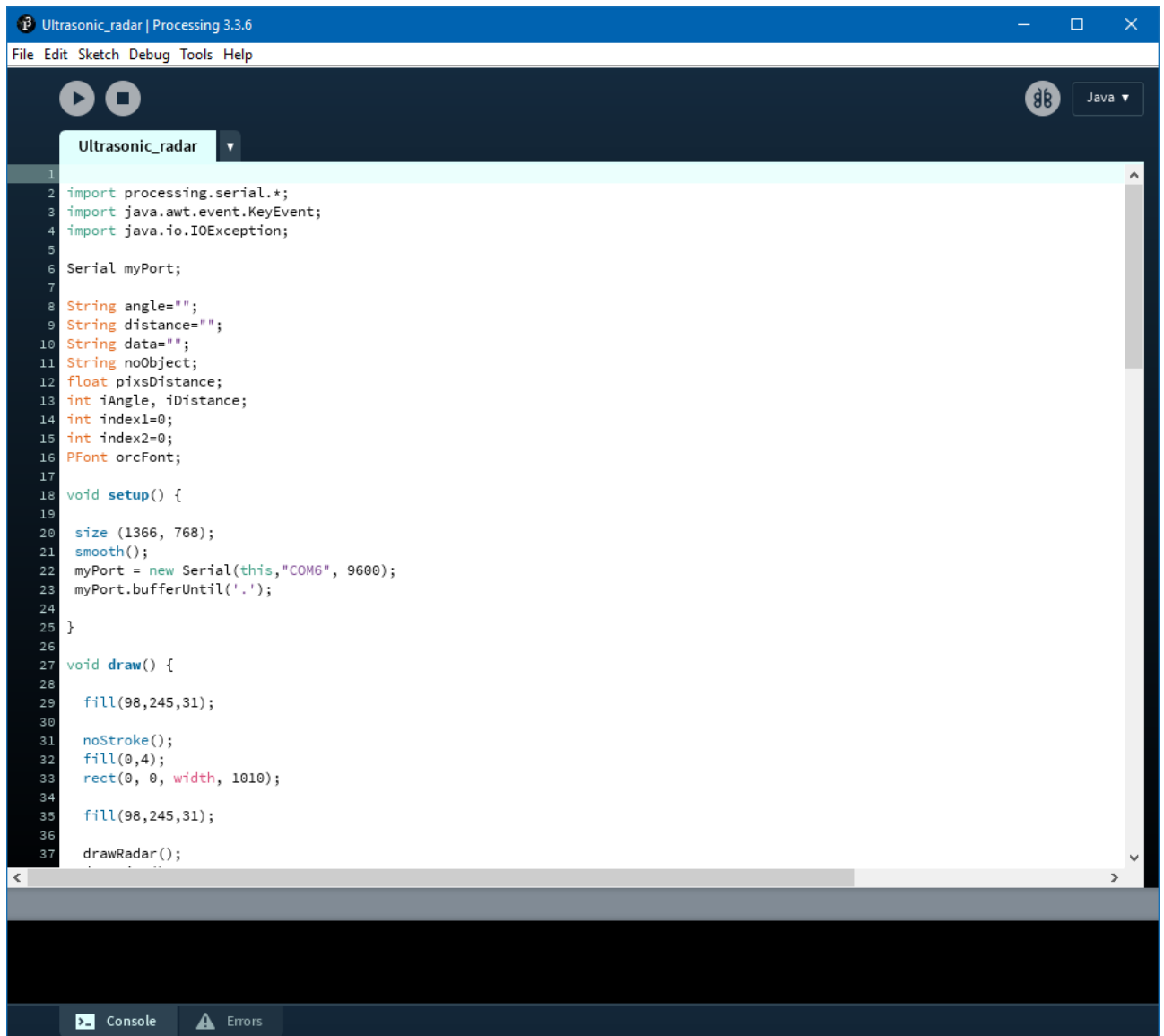


Рис. 4.14. Програма в Processing для візуалізації даних від акустичного радару

Проаналізуйте код програми та спробуйте зрозуміти, яким чином вона працює. Для цього нижче наведено опис деяких функцій та методів, що використовуються у програмі:

- **smooth()** – малює всю геометрію із гладкими (згладженими) краями;
- **fill()** – задає колір, яким будуть зафарбовані фігури;
- **stroke()** – встановлює колір, який використовується для малювання ліній та меж навколо фігур;
- **noStrokes()** – вимикає малювання лінії (контуру);

- **rect()** – малює прямокутник на екрані;
- **arc()** – малює дугу на екрані;
- **rotate()** – обертає об'єкт на деякий кут, який повинен бути вказаний у радіанах (значення від 0 до 2π);
- **readStringUntil()** – повертає нуль, якщо не знаходить заданий символ (є поєднанням функцій `readBytesUntil()` та `readString()`);
- **substring()** – повертає новий рядок, який є частиною вихідного рядка;
- **pushMatrix()** – зберігає поточну систему координат до стеку матриць;
- **popMatrix()** – витягує поточну систему координат зі стеку матриць (методи `pushMatrix()` і `popMatrix()` використовуються разом із іншими методами, які виконують трансформацію фігур).

Також зверніть увагу на наступний рядок коду у програмі:

myPort = new Serial (this,"COM3", 9600);

тут потрібно вказати номер COM порту до якого підключена плата Arduino. Оскільки при підключенні плати Arduino до різних комп'ютерів номер COM-порту може відрізнитись, то цей рядок у подальшому доведеться відредагувати таким чином, щоб номер COM-порту відповідав поточній конфігурації.

4.4. Експериментальна частина

Підключити датчик HC-SR04 до плати Arduino, використовуючи проводи мама-тато як це показано на рис 4.15. Виводи HC-SR04 Vcc та GND підключити до входу на платі Arduino 5V та GND відповідно, вивід датчика HC-SR04 Trig та Echo – до цифрових входів на платі Arduino 10 та 11 відповідно.

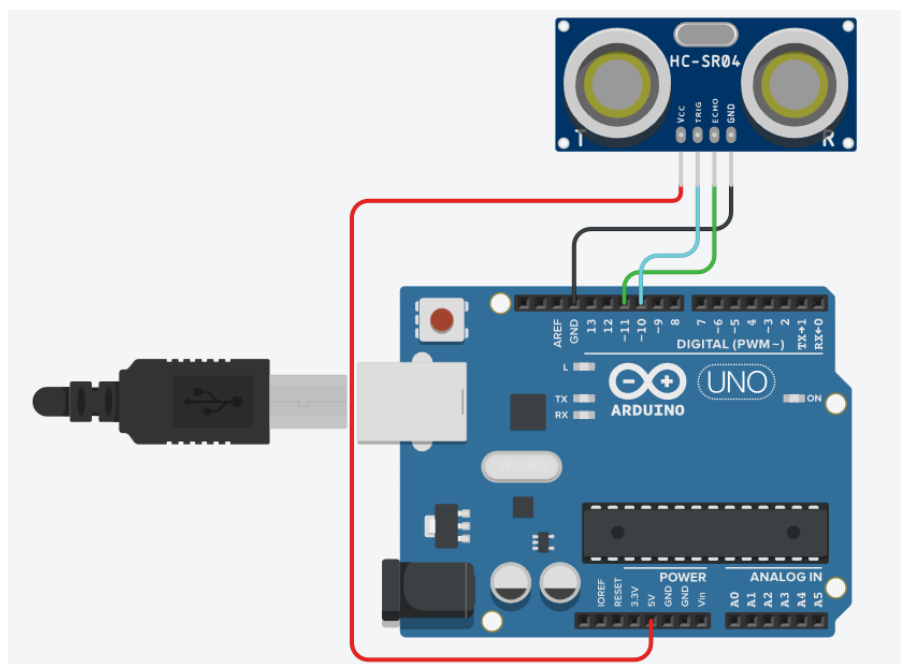


Рис. 4.15. Підключення датчика HC-SR04 до плати Arduino

Напишіть програму (див. рис. 4.12), яка дозволяє виконувати вимірювання відстані від датчика до віддзеркалюючої поверхні. Завантажте її у плату Arduino Uno. Зверніть увагу, що для спостереження результатів вимірювань необхідно відкрити «монітор порта» в Arduino IDE.

Візьміть лінійку, сумістіть початок відліку лінійки із серединою корпусу випромінювача / приймача, після чого на відстані 40 см перпендикулярно до перетворювачів встановіть деяку віддзеркалюючу поверхню (рис. 4.16).

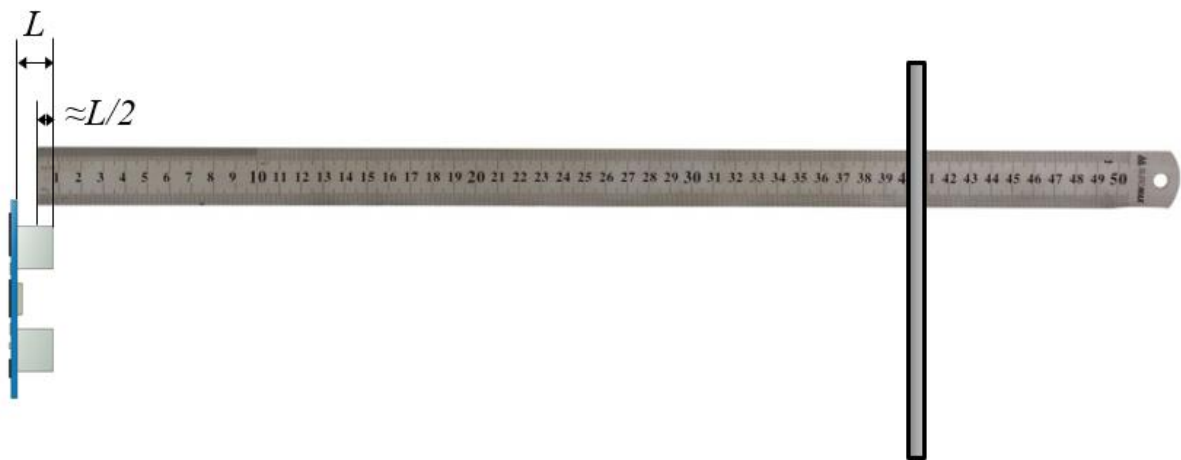


Рис. 4.16. Схема виконання експерименту для вимірювання відстані

Виконайте 20 вимірювань цієї відстані. Для цього можете просто переписати 20 останніх показів у моніторі порта. Результати занесіть у таблицю 4.1.

Після цього, повертаючи відзеркалюючу поверхню відносно вертикальної осі, знайдіть кути, при яких перетворювач припиняє реєструвати віддзеркалений сигнал. Значення кутів внесіть до протоколу лабораторної роботи.

Далі додатково підключіть сервопривід до плати Arduino так, як показано на рис. 4.17. Червоний та коричневий дроти сервоприводу підключити до плати Arduino у гнізда 5V та GND відповідно. Дріт помаранчевого кольору з'єднати за цифровим виводом 12.

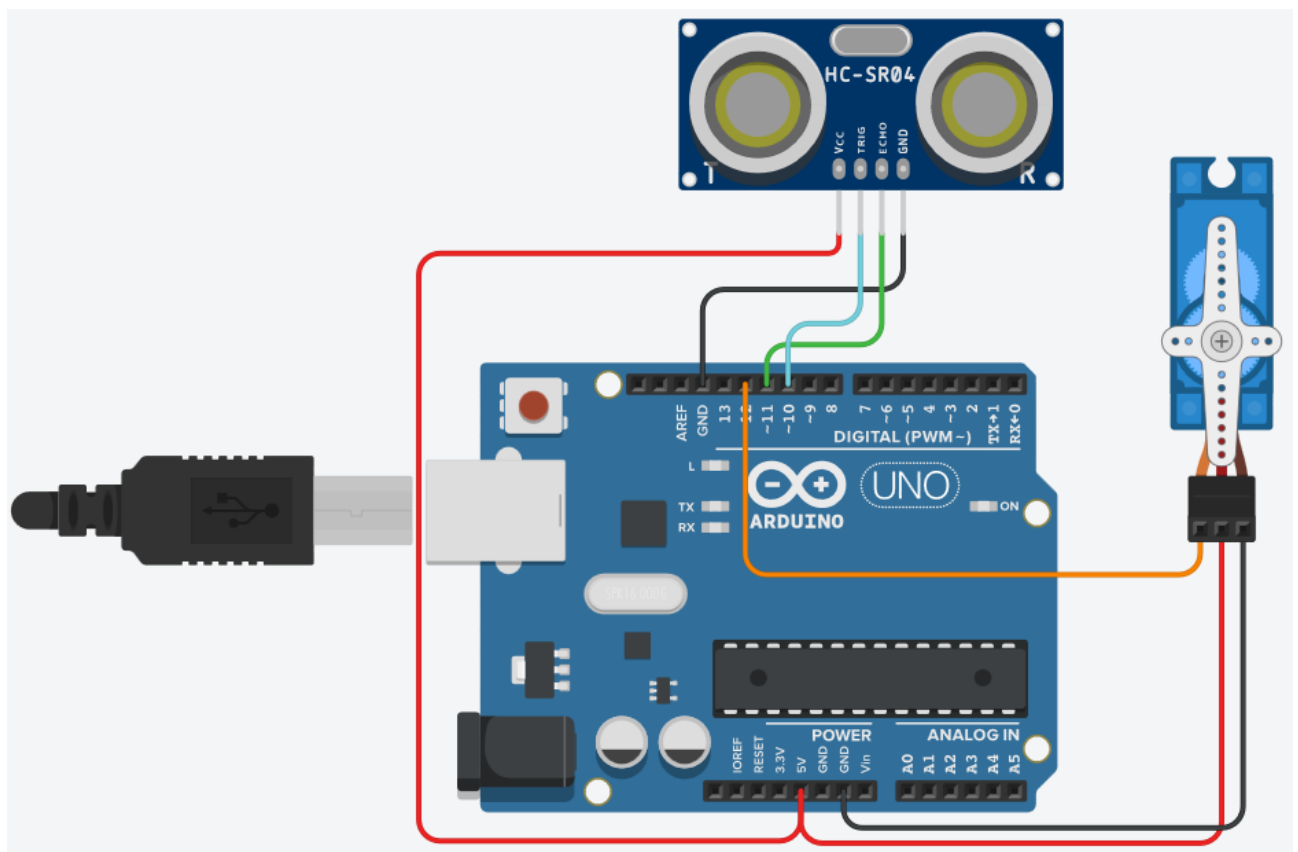


Рис. 4.17. Схема підключення компонентів макету акустичного радара

Після підключення всіх елементів акустичного радара до Arduino завантажити скетч програми під назвою **Ultrasonic_radar.ino** (можна отримати у викладача) за допомогою Arduino IDE. На рис. 4.18 представлено код із цього скетчу.

```
Ultrasonic_radar | Arduino 1.8.9
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

Ultrasonic_radar

#include <Servo.h>
const int trigPin = 10;
const int echoPin = 11;
long duration;
int distance;
Servo myServo;

void setup() {
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  myServo.attach(12);
}

void loop() {
  for(int i=15;i<=165;i++){
    myServo.write(i);
    delay(30);
    distance = calculateDistance();
    Serial.print(i);
    Serial.print(",");
    Serial.print(distance);
    Serial.print(".");
  }
  for(int i=165;i>15;i--){
    myServo.write(i);
    delay(30);
    distance = calculateDistance();
    Serial.print(i);
    Serial.print(",");
    Serial.print(distance);
    Serial.print(".");
  }
}

int calculateDistance(){
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
  distance= duration/58.8;
  return distance;
}

Компиляция завершена
Скетч использует 4526 байт (14%) памяти устройства. Всего доступно 32256 байт.
Глобальные переменные используют 231 байт (11%) динамической памяти, оставляя 1817 б


47 Arduino/Genuino Uno на COM5
```

Рис. 4.18. Скетч, що повинен бути завантажений у плату Arduino Uno

У результаті вдалого завантаження програми сервопривід повинен почати рухатися.

Далі запустити на комп'ютері середовище розробки програм Processing та відкрити файл під назвою **Ultrasonic_radar.pde**. У рядку коду

```
myPort = new Serial(this,"COM?", 9600)
```

замінити номер COM-порту на той, до якого підключена плата Arduino Uno у вашому випадку. Після цього натиснути кнопку **Run** . Якщо все підключено вірно, радар почне показувати об'єкти які стоять поруч (рис. 4.19).

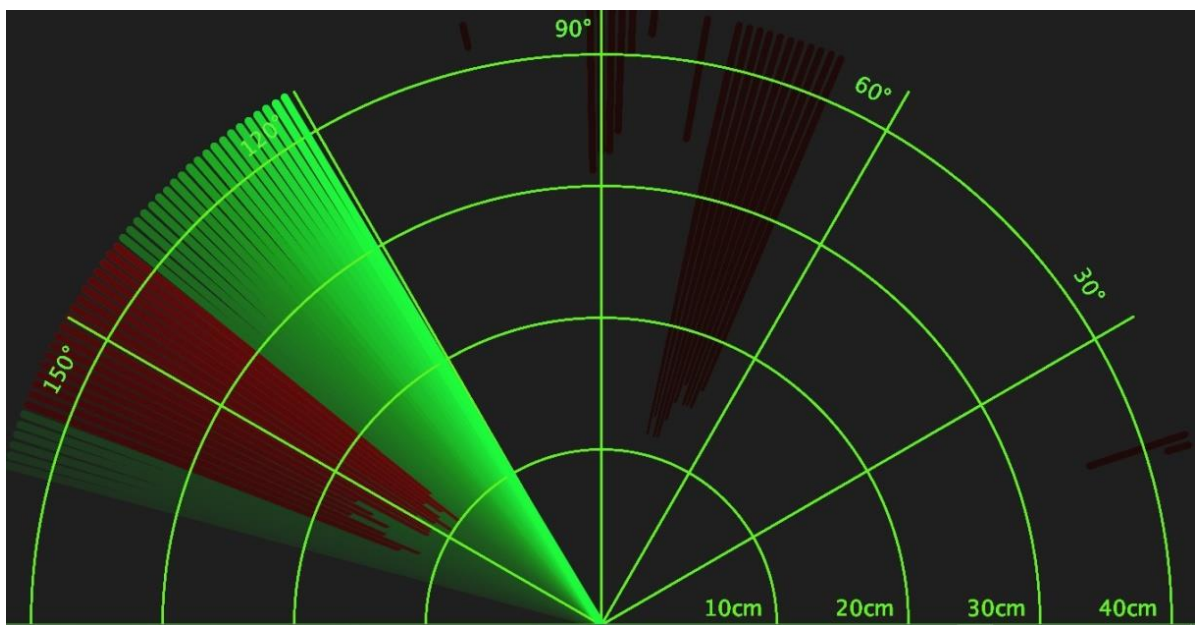


Рис. 4.19. Візуалізація даних, отриманих за допомогою акустичного радару, у програмі Processing

Зверніть увагу, що програма, написана у середовищі Processing, відображає результати вимірювань на відстанях менше за 40 см.

Встановіть різноманітні предмети у зоні дії акустичного радару та спостерігайте результат на екрані. Зверніть увагу, що час від часу з'являться хибні спрацьовування радару вздовж деяких напрямків. Або відстані вздовж сусідніх напрямків (у випадку продовгуватого об'єкту) виявляються різними, хоча мали б бути однаковими. Все це обумовлено впливом різних чинників (рух повітря в зоні дії акустичного радару, різні шуми, мала інтенсивність

віддзеркаленого сигналу, вплив електричних вимірювальних ланцюгів тощо) і призводить до виникнення похибки. Для зменшення впливу цих чинників необхідно виконувати багатократні вимірювання вздовж одного напрямку, відсіювати результати із грубими похибками та робити усереднення.

Зробіть копію програми **Ultrasonic_radar.ino**, після чого модифікуйте її таким чином, щоб виконувалось усереднення вимірювання відстані вздовж кожного окремого напрямку за трьома значеннями. І саме тільки це усереднене значення повинно передаватись у послідовний порт. Це призведе до більш повільного обертання вала сервопривода, проте результати повинні стати точніше. Завантажте новий скетч у плату та перевірте його працездатність.

4.5. Оформлення експериментальних результатів

Результати вимірювань відстані мають бути оформлені у вигляді таблиці 4.1.

Табл. 4.1. Результати експериментів

Номер вимірювання	Значення відстані, см
1	
2	
...	
20	

За результатами вимірювань визначити ті дані, які належать до грубих похибок (якщо такі будуть). Грубі похибки (промахи) відносяться до числа похибок, що змінюється випадковим чином при повторних спостереженнях. Вони явно перевищують за своїм значенням похибки, виправдані умовами проведення експерименту. Для виключення грубих похибок використовують наступні критерії (якщо підтверджується гіпотеза про відповідність закону

розподілу виміряних величин нормальному): Ірвіна, Романовського, Діксона, Смірнова, Шовене, Грубса та варіаційного розмаху.

У цій лабораторній роботі ми не будемо докладно зупинятись на методах відсіювання грубих похибок. Також не будемо використовувати зазначені вище критерії. Насправді для відсіювання грубих похибок ми використаємо дуже спрощений критерій: результати, які більше ніж на 30% відрізняються від середньоарифметичного, будуть вважатись грубими похибками і мають бути усунені.

Таким чином, спочатку для усіх вимірювань (включно із грубими похибками) розраховують середнє арифметичне. Потім перевіряють зазначену умову і відкидають ті результати, які належать до промахів. Після відсіювання результатів із грубими похибками знову розраховують середнє значення відстані. Саме це середнє значення, отримане за результатами вимірювань із урахуванням відкинутих грубих похибок, порівнюють із дійсним значенням та знаходять відносну похибку.

4.6. Контрольні запитання

1. Поясніть, у чому полягає ідея луна-імпульсного вимірювання відстані?
2. Опишіть конструкцію роздільно-суміщеного ультразвукового перетворювача та принцип вимірювання відстані, який реалізується на його основі.
3. Поясніть, яким чином підключити плату Arduino Uno до комп'ютера та які налаштування повинні бути виконані у середовищі Arduino IDE, щоб можна було завантажити скетч у плату?
4. Поясніть код зі скетча, який завантажується у мікроконтролер.
5. Поясніть код програми для візуалізації даних на комп'ютері.
6. Поясніть, чому при обертанні віддзеркалючої поверхні перетворювач у деякому діапазоні кутів буде реєструвати віддзеркалений сигнал, а при

перевищені крайніх значень кутів сигнали вже не будуть реєструватись. Під час пояснень використовуйте графічні побудови.

7. Опишіть чинники, які обумовлюють виникнення похибки вимірювання відстані до об'єктів у повітрі із використанням датчика HC-SR04.

Список використаних джерел для лабораторної роботи №4

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И.В. Савельев. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1970. – 508 с.

2. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.

3. Ультразвуковой датчик расстояния Ардуино HC-SR04 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04/>

4. Радар на ардуино! [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.youtube.com/watch?v=wOBoQ2WoAQw>

5. Processing [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Processing>

6. Reference [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://processing.org/reference/>

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ П'ЄЗОЕЛЕМЕНТІВ

Мета роботи: ознайомитись із методами випробувань та вимірювань основних електричних, механічних та електромеханічних характеристик п'єзокерамічних матеріалів, що використовуються для виготовлення п'єзоелектричних перетворювачів.

5.1. Основні положення

5.1.1. Поняття п'єзоефекту

Прямим п'єзоелектричним ефектом називають явище поляризації діелектрика під дією механічної напруги. Електричний заряд, що виникає на кожній з поверхонь діелектрика, змінюється за лінійним законом залежно від механічних зусиль:

$$Q = d \cdot F,$$

$$\frac{Q}{S} = \sigma = \frac{d \cdot F}{S} = d \cdot T = P,$$

де Q – заряд, d – п'єзомодуль прямого п'єзоефекту, F – прикладене зусилля, P – поляризованість, T – механічна напруга, σ – поверхнева щільність зарядів, S – площа, T – тиск.

При зворотному п'єзоелектричному ефекті відбувається зміна розмірів діелектрика Δl залежно від напруженості електричного поля E за лінійним законом:

$$\frac{\Delta l}{l} = \delta = d \cdot E,$$

де δ – відносна деформація, d – п'єзомодуль зворотного п'єзоефекту.

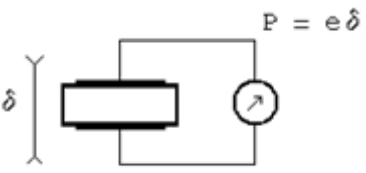

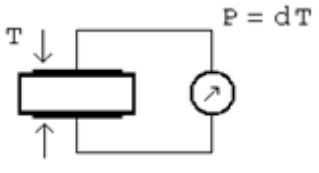
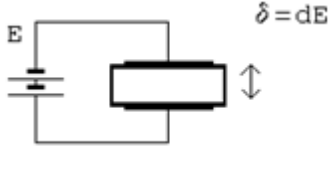
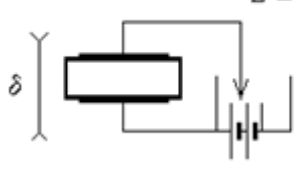
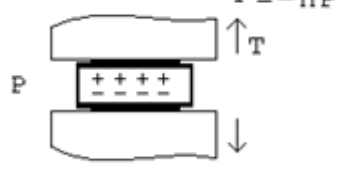
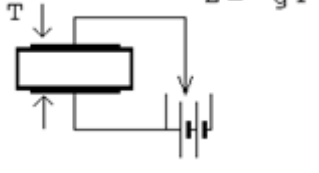
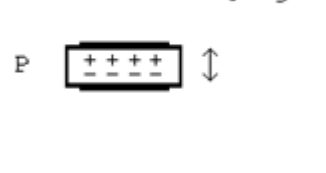
Термодинамікою доведено, що п'єзомодулі d прямого і зворотного п'єзоефекту для одного і того ж матеріалу рівні між собою.

Розрізняють також подовжній та поперечний п'єзоелектричні ефекти. При подовжньому п'єзоефекті механічні зусилля та напруженості електричного поля діють уздовж однієї лінії. При поперечному п'єзоелектричному ефекті лінії механічних зусиль та електричних напруженостей ортогональні.

5.1.2. Способи вимірювання п'єзоефіцієнтів

У таблиці 5.1 описані режими п'єзоелектричного перетворення, а також наведені схеми відповідних цим режимам способів вимірювання п'єзоефіцієнтів.

Табл. 5.1. Способи вимірювання п'єзоефіцієнтів

Коефіцієнти п'єзоефекту	Прямий п'єзоефект	Зворотний п'єзоефект
e , Кл/м ²	 $P = e\delta$	 $T = -eE$
d , Кл/Н	 $P = dT$	 $\delta = dE$
h , Н/Кл	 $E = -h\delta$	 $T = -hP$
g , м ² /Кл	 $E = -gT$	 $\delta = gP$

З лівого боку кожної схеми у таблиці 5.1. зображені ті величини, що задаються:

- при прямому п'єзоефекті – механічна напруга (протилежно направлені стрілки) і механічні деформації (сполучені зустрічні стрілки);

- при зворотному п'єзоефекті – батарея (джерело напруги) і джерело заряду.

Неважко помітити, що найбільш прості вимірювання п'єзокоефіцієнтів e і h при прямому п'єзоефекті та d – при зворотному.

5.1.3. Основні параметри керамічних п'єзоелектричних перетворювачів

Параметри п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) можна розділити на ті, що вимірюються, та на ті, що розраховуються.

До вимірюваних параметрів належать:

- ємність C_0 , Ф;
- діелектричні втрати $\operatorname{tg}\delta$, де δ – кут втрат;
- резонансна f_p та антирезонансна f_a частоти товщинних (подовжніх) коливань, Гц;

- резонансна частота радіальних коливань f_r , Гц;
- опір на резонансній частоті R_p , Ом;
- п'єзомодуль d_{33} (для подовжнього п'єзоефекту), Кл/Н.

До розрахункових параметрів належать:

- діелектрична проникність ϵ ;
- п'єзомодуль d_{31} (для поперечного п'єзоефекту), Кл/Н;
- добротність Q ;
- модуль Юнга E_Y , Па;
- коефіцієнт електромеханічного зв'язку β ;
- питомий електричний опір ρ_V , Ом·м;
- швидкість поширення подовжніх хвиль C_l , м/с.

На рис. 5.1б представлена еквівалентна схема п'єзоперетворювача, яка побудована методом електромеханічних аналогій, що досить повно описує

електричні властивості ненавантаженого п'єзоелементу поблизу частоти основного резонансу.

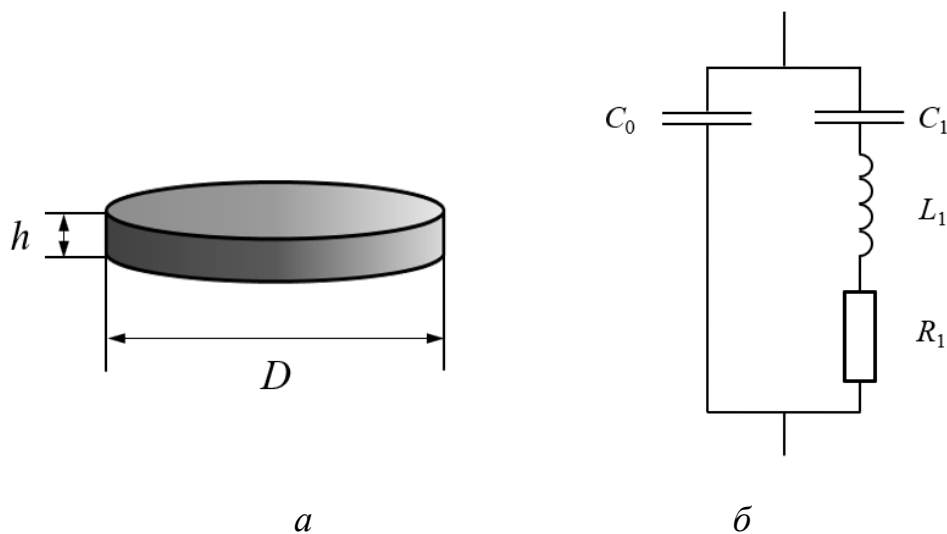


Рис. 5.1. П'єзоелектричний перетворювач:

a – геометричні характеристики; b – еквівалентна схема

На зображеній схемі (рис. 5.1б) індуктивність L_1 еквівалентна масі перетворювача, що коливається; ємність C_1 еквівалентна гнучкості (пружній податливості) перетворювача, як механічної коливальної системи; опір R_1 має дві складові: опір механічних втрат та опір випромінювання; ємність C_0 – статична електрична ємність перетворювача, що утворена його електродами та п'єзоелектриком.

Елементи L_1 , C_1 , R_1 – динамічні параметри п'єзоперетворювача, що утворюють так звану механічну гілку еквівалентної схеми. Динамічні параметри визначаються фізичними властивостями матеріалу, з якого виготовлено п'єзоперетворювач, його геометрією, топологією та формою електродів, напрямком та ступенем поляризації п'єзоелектрика. Елемент C_0 утворює електричну гілку еквівалентної схеми.

Основною особливістю еквівалентної схеми, що зображена на рис. 5.1б, є наявність двох коливальних контурів: послідовного та паралельного. Це приводить до того, що така схема має два резонанси: механічний (послідовний

коливальний контур, резонанс напруг) та електромеханічний (паралельний коливальний контур, резонанс струмів).

При послідовному резонансі реактивні опори механічної гілки L_1 та C_1 взаємно компенсують один одного. У такому випадку з електричної точки зору п'єзоперетворювач може розглядатись як паралельно включені статична ємність C_0 та механічний опір R_1 .

При паралельному резонансі через механічну (елементи L_1 , C_1 , R_1) і електричну (елемент C_0) гілки еквівалентної схеми протікають струми, які більші за струм, що проходить через весь контур, причому ці струми більші у деяке число разів, яке називається добротністю. Ці великі струми не покидають меж контура, тому що вони протифазні і самі себе компенсують. Варто також зауважити, що опір паралельного коливального контуру на резонансній частоті прагне до нескінченності (на відміну від послідовного коливального контуру, опір якого на резонансній частоті прагне до нуля). Таким чином, опір п'єзоперетворювача на резонансній частоті мінімальний (при цьому вихідний струм досягає максимального значення), а на антирезонансній частоті опір максимальний і носить активний характер (при цьому вихідний струм мінімальний).

5.2. Вимірювання параметрів п'єзоперетворювачів

Ємність перетворювача C_0 і діелектричні втрати $\operatorname{tg}\delta$ вимірюються універсальним мостовим приладом на низькій (підтональній) частоті. На високих частотах C_0 і $\operatorname{tg}\delta$ вимірюються за допомогою методів заміщення, розладу контуру та методом Q -метра.

Резонансна f_p і антирезонансна f_a частоти вимірюються методом пасивного чотириполюсника. Частота резонансу f_p – частота механічного резонансу, яка визначається для послідовного коливального контуру (рис. 5.1б). Частота

антирезонансу f_a – частота електромеханічного резонансу, яка визначається для паралельного коливального контуру. Причому завжди виконується умова $f_a > f_p$.

Для п'єзоелектричного резонатора із суцільними електродами резонансну та антирезонансу частоти можна розрахувати за наступними формулами:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}}, \quad (5.1)$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C_1 + C_0}{L_1 \cdot C_1 \cdot C_0}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_1} \left(1 + \frac{C_1}{C_0}\right)}. \quad (5.2)$$

При антирезонансі загальна ємність контуру визначається за формулою:

$$C_\Sigma = \frac{C_0 \cdot C_1}{C_0 + C_1}.$$

Оскільки величина C_1 на декілька порядків менша за C_0 , то частота антирезонансу мало відрізняється від частоти резонансу.

Як і будь-яке тверде пружне тіло п'єзоелемент має власну частоту механічних коливань. Незалежно від своїх п'єзоелектричних властивостей пластина п'єзоелементу (більшість п'єзоперетворювачів, що використовуються в ультразвуковому неруйнівному контролі, являють собою пластини різних геометричних форм) здатна до механічних коливань як система, що складається з маси на пружині. Проте у пластині маса та сила пружини розподілені рівномірно, тому вона, на відміну від маси на пружині, окрім основного коливання може здійснювати й більш високі гармонійні коливання (як натягнута струна). Спектр власних частот визначається розмірами та конструктивними формами п'єзоелементу, способом кріплення, пружними властивостями п'єзоматеріалу і типом деформації в процесі коливань. Теоретична резонансна частота поздовжніх коливань п'єзопластики може бути розрахована за формулою:

$$f_p = \frac{C_l}{2h}, \quad (5.3)$$

де C_l – швидкість поздовжніх ультразвукових коливань в п'єзопластині, h – товщина п'єзопластини (рис. 5.1а).

Схема вимірювання частот резонансу та антирезонансу представлена на рис. 5.2. Вимірювання частот проводиться наступним чином. На генераторі встановлюють початкову частоту (що значно менша резонансної), після чого за допомогою осцилографа вимірюють амплітуду сигналу на навантаженні. Збільшуючи частоту генератора із заданим кроком та вимірюючи амплітуду сигналу, знаходять власну резонансну частоту перетворювача – вона фіксується при максимальній амплітуді на навантаженні. Потім, підвищуючи частоту генератора, знаходять мінімальну амплітуду сигналу на навантаженні (рис. 5.3). Цьому значенню відповідає антирезонансна частота п'єзоелемента.

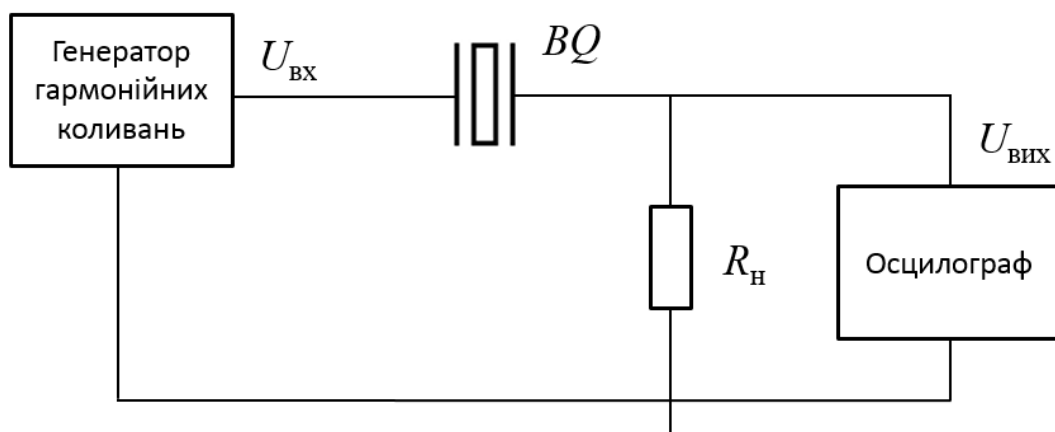


Рис. 5.2. Структурна схема вимірювального пристрою для вимірювання f_p , f_a , R_p

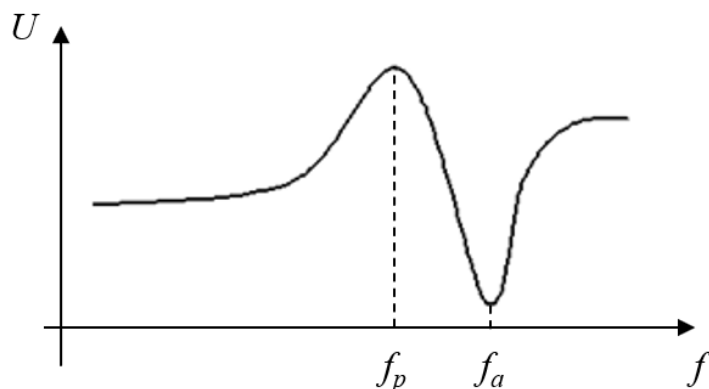


Рис. 5.3. «Ідеальна» АЧХ п'єзоперетворювача, побудована на основі його еквівалентної схеми

Реальна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) перетворювача відрізнятиметься від показаної на рис. 5.3 тим, що на неї будуть накладені додаткові піки, які обумовлені резонансними частотами радіальних, крутильних, згинних та зсувних коливань пластини. Проте вони будуть не настільки вираженими, як резонансна частота товщинних (поздовжніх) коливань.

Резонансна частота радіальних коливань f_r може бути виміряна аналогічним чином, як і частоти f_p та f_a . Орієнтовне значення частоти f_r можна також розрахувати за наступною формулою (для плоского дискового перетворювача):

$$f_r = \frac{2,05 \cdot C_l}{\pi D \sqrt{1 - \nu^2}},$$

де C_l – швидкість подовжніх коливань, м/с; D – діаметр п'єзоперетворювача, м; ν – коефіцієнт Пуассона.

На практиці для визначення резонансної частоти радіальних коливань дискового перетворювача використовують наступну формулу:

$$f_r = \frac{1,35 \cdot C_l}{2D}.$$

Опір на резонансній частоті R_p визначається за формулою:

$$R_p = R_n \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} - 1 \right), \quad (5.4)$$

де R_n – опір навантаження, який включено у схему вимірювання параметрів (рис. 5.2) при вимірюванні f_p (у лабораторному стенді $R_n=68$ Ом); $U_{\text{вх}}$ – напруга на вході перетворювача; $U_{\text{вих}}$ – напруга на виході перетворювача на резонансній частоті.

П'єзомодуль d_{33} поздовжнього п'єзоефекту вимірюється в статичному режимі наступним чином: у момент зняття навантаження заряд, що з'являється на електродах, фіксується дзеркальним гальванометром, який вимірює величину заряду.

5.3. Розрахунок параметрів п'єзоперетворювачів

Геометрична ємність п'єзоелементу C_0 зазвичай вимірюється спеціальними приладами, проте може бути розрахована за наступною формулою:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h}, \quad (5.5)$$

де h – товщина п'єзоелементу, м; ε – відносна діелектрична проникність п'єзоматеріалу; S – площа п'єзоелементу, м²; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – електрична постійна, Ф/м.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку β є енергетичною характеристикою п'єзоелементу як електромеханічного перетворювача енергії:

$$\beta = \sqrt{\frac{W_m}{W}} = \sqrt{\frac{W_e}{W}},$$

де W_m – енергія, запасена в механічній формі; W_e – енергія електричного поля, що генерується п'єзоелементом; $W = W_m + W_e$ – повна енергія деформованого п'єзоелектрика.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку може бути розрахований за приблизною формулою (у випадку малих значень $\beta < 0,5$):

$$\beta \approx \sqrt{\frac{2(f_a - f_p)}{f_p}} = \sqrt{\frac{2\Delta f}{f_p}}. \quad (5.6)$$

П'єзомодуль d_{31} поперечного п'єзоефекту визначається розрахунковим шляхом за значеннями резонансної і антирезонансної частот, діелектричної проникності п'єзоелементу і густини кераміки, з якої зроблений п'єзоелемент.

У п'єзомодуля d_{31} перший індекс відноситься до електричного поля, направлено паралельно товщині диска. Другий індекс відноситься до деформації, перпендикулярної напрямку поляризації, тобто направленої вздовж радіусу диска.

П'єзомодуль перетворювачів у формі диска при $\beta \leq 0,5$ визначається за формулою:

$$d_{31} = \frac{6 \cdot 10^{-7} \beta}{f_r} \cdot \frac{2}{D} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}},$$

де D – діаметр дискового перетворювача, м; f_r – резонансна частота радіальних коливань, Гц; ρ – густина п'єзоматеріалу, кг/м³.

Важливим параметром резонатора, яким є п'єзоелемент, є механічна добротність Q , яка визначає, у скільки разів запаси енергії в системі більші, ніж втрати енергії за один період коливань (тобто, добротність характеризує здатність п'єзоелементу зберігати накопичену в ньому енергію). Чим більша добротність, тим менші втрати енергії в системі за одне коливання. Величина добротності характеризує також і вибірковість коливальної системи: чим більше добротність, тим вужче смуга частот зовнішньої сили, яка може викликати інтенсивні коливання системи. Механічна добротність п'єзоелементу розраховується за формулою:

$$Q = \frac{f_a^2}{2\pi R_p C_0 f_p (f_a^2 - f_p^2)}. \quad (5.7)$$

Зазвичай промислові марки п'єзокераміки мають добротність в межах 15...1000.

Модуль Юнга $E_{Ю}$ розраховується за формулою:

$$E_{Ю} = 4\rho h^2 f_p^2.$$

Питомий об'ємний електричний опір ρ_V визначається за формулою:

$$\rho_V = \frac{RS}{h},$$

де R – повний опір перетворювача, Ом; S – площа електродів (тільки з однієї сторони перетворювача), м²; h – товщина п'єзоелементу, м.

5.4. Технічні характеристики п'єзоматеріалу ЦТС-19

Основним п'єзоматеріалом, із якого виготовляються перетворювачі для ультразвукового неруйнівного контролю є ЦТС-19, який має наступні характеристики:

- відносна діелектрична проникність $\varepsilon=1725\pm325$;
- тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta=0,035$;
- питомий об'ємний електричний опір $\rho_V=1\cdot10^8$ Ом·м;
- електрична міцність E_M , не менше $3,0\cdot10^6$ В/м;
- температура точки Кюрі T_K , не менше 290°C ;
- коефіцієнт електромеханічного зв'язку β , не менше 0,4;
- п'єзоелектричний модуль d_{33} , не менше $200,0\cdot10^{-12}$ Кл/н;
- п'єзоелектричний модуль d_{31} , не менше $100,0\cdot10^{-12}$ Кл/н;
- модуль Юнга $E_Y=(0,55-0,85)\cdot10^{11}$ Па;
- механічна добротність Q , не менше 50;
- густина $\rho=7,45\cdot10^3$ кг/м³.

У цій лабораторній роботі для досліджень застосовуються саме перетворювачі із п'єзоматеріалу ЦТС-19.

5.5. Експериментальна частина

Виміряти геометричні розміри різних п'єзоелементів (видаються викладачем) та попередньо розрахувати резонансну частоту поздовжніх коливань для кожного п'єзоелемента за формулою (5.3) – при цьому швидкість поздовжніх ультразвукових коливань в п'єзопластині ЦТС-19 взяти із довідникових джерел. Дані занести у таблицю 5.3.

За допомогою мультиметра виміряти реальну ємність кожного п'єзоелементу. Дані занести у таблицю 5.3. Порівняти отримані значення з розрахованими за формулою (5.5).

Зібрати схему вимірювального стенду (рис. 5.2). Встановити початкове значення частоти³ на генераторі та виміряти амплітуду. Дані занести у таблицю 5.2. Ті ж дії повторити з певним кроком⁴ за частотою до кінцевого значення частоти (зазвичай, на 20-30% вище розрахованої резонансної частоти п'єзoeлементa). За результатами експериментів побудувати графік АЧХ, за яким визначити резонансну та антирезонансну частоти. Порівняти розраховане значення резонансної частоти з експериментальним.

Швидкість звуку в матеріалі п'єзоперетворювача $C_{цтс}$ повинна бути уточнена за результатами експерименту, для чого використовувати наступну формулу:

$$C_{цтс} = 2hf_p.$$

де f_p – виміряне у результаті експерименту значення резонансної частоти.

Розрахувати опір R_p за формулою (5.4), коефіцієнт електромеханічного зв'язку β за формулою (5.6) та механічну добротність п'єзoeлементу Q за формулою (5.7). У зазначених формулах для розрахунків використовувати параметри, визначені під час експерименту. Дані занести у таблицю 5.3.

Провести моделювання еквівалентної схеми п'єзоперетворювача (рис. 5.1б) за допомогою програми Multisim. Схема моделювання представлена на рис. 5.4.

³ Початкове значення частоти має бути значно меншим за розраховану резонансну частоту п'єзoeлементa. П'єзопластини, які використовуються у цій лабораторній роботі, зазвичай мають частоти резонансів у межах від сотень кілогерц до одиниць мегагерц. Тому, як початкову частоту генератора можна обрати, наприклад, 100 кГц. Якщо ж будуть використовуватись перетворювачі із частотами резонансів у межах десятків кілогерц, то початкова частота генератора має бути знижена до одиниць кілогерц.

⁴ Крок за частотою можна обрати у межах 50-100 кГц для перетворювачів із резонансною частотою у межах одиниць мегагерц. При цьому варто пам'ятати, що для того, щоб точно визначити частоти резонансу та антирезонансу, необхідно в околі цих частот крок зменшувати (навіть інколи і до одиниць кілогерц), щоб якомога точніше знайти їх.

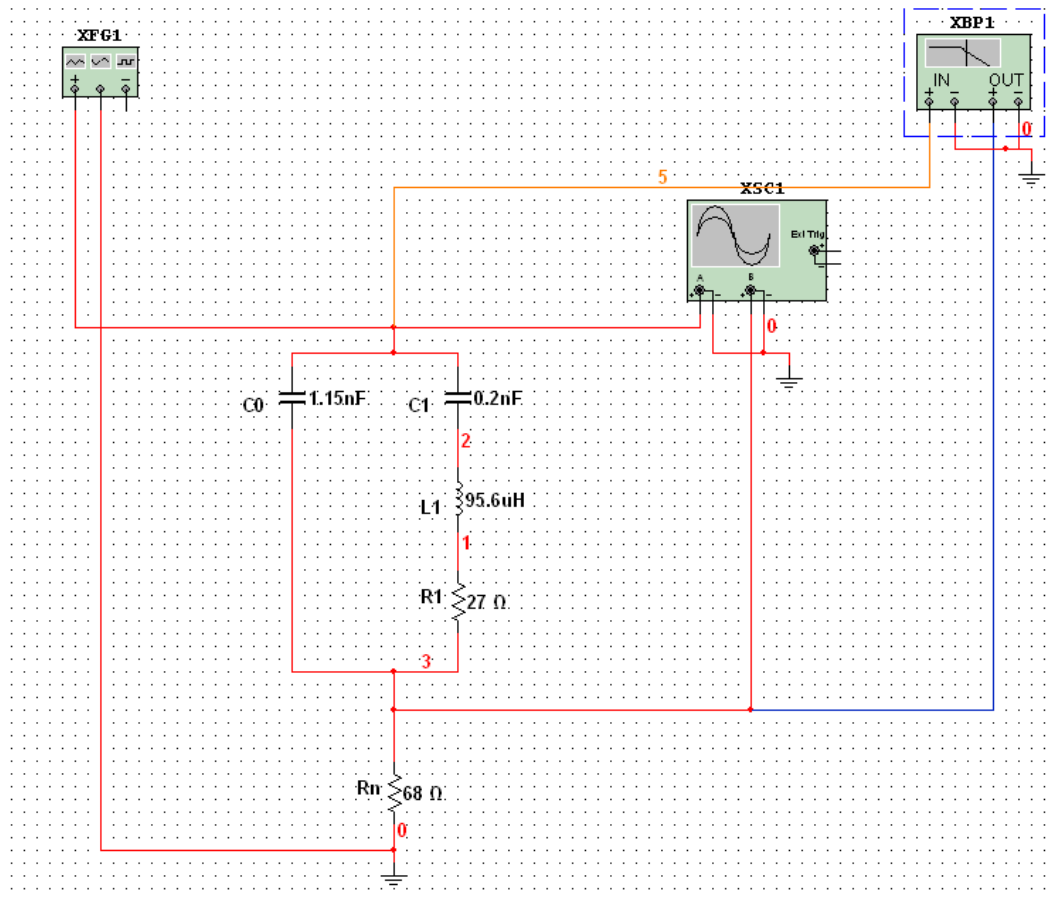


Рис. 5.4. Моделювання еквівалентної схеми в програмі Multisim

Для завдання змінного гармонійного вхідного сигналу використати блок **Function Generator** (XFG1), амплітудно-частотну характеристику контуру знімати за допомогою плоттеру Бode (**Bode Plotter**, XBP1). За допомогою осцилографа **Oscilloscope** (XSC1) переглянути графіки вхідного та вихідного сигналів.

Для проведення моделювання спочатку необхідно визначити всі параметри електричних елементів. Ємність C_0 розраховують за формулою (5.5), ємність C_1 та індуктивність L_1 (див. рис. 5.4) – за формулами (5.1) та (5.2), підставляючи у них виміряні значення f_p та f_a . На схемі моделювання опір R_1 відповідає опору на резонансній частоті R_p , який знаходять за формулою (5.4).

На рис. 5.5 зображена схема для моделювання п'єзоперетворювача частотою 1 МГц. Щоб побачити АЧХ такого перетворювача, необхідно відкрити

плоттер Боде і встановити такі параметри по горизонталі та вертикалі, які зображені на рис. 5.5.

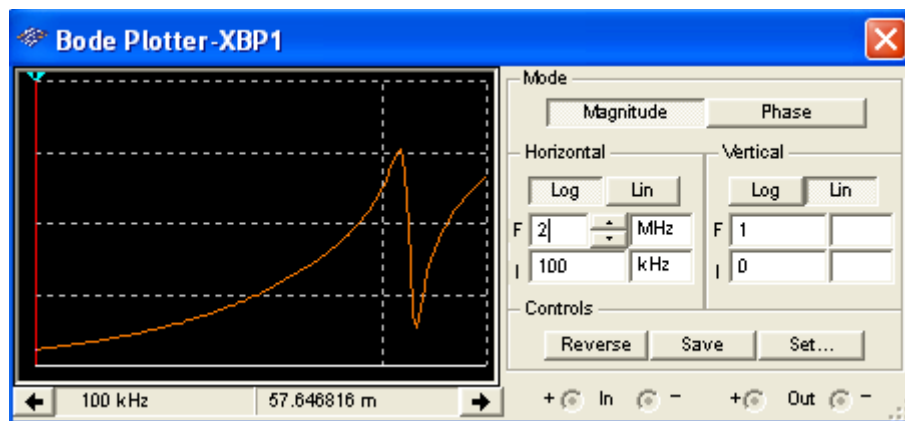


Рис. 5.5. Амплітудно-частотна характеристика перетворювача (у плоттері Боде)

Порівняти для кожного перетворювача промодельовані та експериментальні АЧХ.

Зробити висновки по роботі.

5.6. Оформлення експериментальних результатів

Результати вимірювань занести у таблиці 5.2 та 5.3.

Табл. 5.2. Результати вимірювання АЧХ окремого п'єзoelementу

Частота, Гц	Амплітуда, В
$f_1=$	
$f_2=$	
$f_3=$	
...	
$f_n=$	

Таблиці та графіки АЧХ для кожного п'єзoelementу побудувати на окремих аркушах і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

Табл. 5.3. Розраховані та виміряні характеристики окремого п'єзoelementу

№ ПЕП	Товщина h , мм	Діаметр D , мм	Геометрична ємність C_0 , Ф		Частота резонансу f_p , Гц		Частота антирезонансу, Гц	Опір R_p , Ом	Коефіцієнт β	Добротність Q
			Розрах.	Вимір.	Розрах.	Вимір.				
1										
2										
3										

5.7. Контрольні запитання

1. Що таке п'єзoeлектричний ефект?
2. Поясніть, як теоретично визначити робочу частоту п'єзoeлектричного перетворювача?
3. Що характеризує коефіцієнт електромеханічного зв'язку?
4. Поясніть еквівалентну електричну схему п'єзoeлектричного перетворювача.
5. Чому антирезонансна частота вище резонансної?
6. Поясніть, що таке послідовний і паралельний резонанс.
7. Як пояснити на АЧХ п'єзoelementa той факт, що напруга резонансу більша, ніж напруга антирезонансу?
8. Що таке добротність?
9. Чому розраховане за формулою значення резонансної частоти відрізняється від експериментального?

Список використаних джерел для лабораторної роботи №5

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
2. Глозман И.А. Пьезокерамика / И.А. Глозман. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.
3. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И.Н.Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
4. Козлов В.В. Проверка средств неразрушающего контроля / В.В. Козлов. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 215 с.
5. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова; под ред. В.М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ДИСПЕРСІЇ ШВИДКОСТІ ЗГИННИХ ХВИЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ФІГУР ХЛАДНІ

Мета роботи: ознайомитись з методом збудження згинних коливань, схемою і роботою магнітострикційного випромінювача, а також з особливостями поширення згинних хвиль у пластинах.

6.1. Основні положення

6.1.1. Нормальні хвилі

В обмежених твердих тілах існують хвилі Лемба (у пластинах) і хвилі Порхгамера (у стрижнях). Їхня загальна назва – нормальні хвилі. У напрямку, перпендикулярному до поверхні пластини або стрижня, нормальні хвилі утворюють нерухому хвилю. У пластині або стрижні певної товщини можуть поширюватися різні типи (моди) нормальних хвиль із різним розподілом коливань по товщині.

Хвилі у пластинах застосовують для ультразвукового контролю тонких листів, труб, оболонок, а хвилі в стрижнях – для контролю дротів, стрижнів, труб (при поширенні уздовж осі труби). Швидкість поширення цих хвиль змінюється залежно від частоти (це явище називається дисперсією швидкості), пружних властивостей матеріалу та поперечних розмірів пластини або стрижня.

Нормальні хвилі можуть бути симетричними (мають індекс s) або антисиметричними (мають індекс a). Антисиметричні хвилі викликають згинні коливання пластини з елементом зсуву. Симетричні хвилі викликають розтяг-стиснення пластини (рис. 6.1).

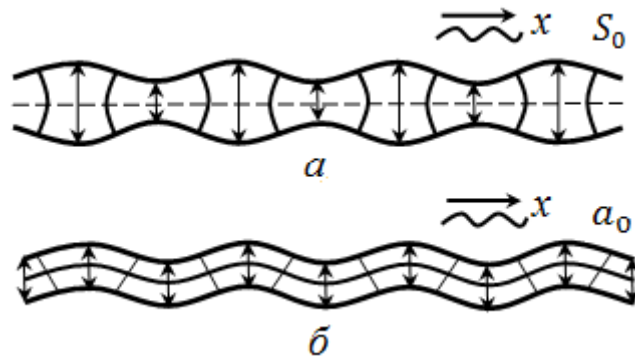


Рис. 6.1. Схематичне зображення хвиль: a – симетричних; $б$ – антисиметричних; x – напрямок поширення хвиль; стрілками показані напрямки зміщень по осі y

Індекс біля літер a та s показує, скільки половин довжини поздовжньої або поперечної хвилі укладається по товщині пластини при поширенні даної моди нормально до поверхні.

Фазова швидкість C_p – це швидкість зміни фази в напрямку поширення хвилі, у даному випадку уздовж пластини. Якщо вся пластинка коливається по товщині (фаза хвилі на всій поверхні однакова), фазова швидкість уздовж пластини буде нескінченно великою. Фазова швидкість дозволяє розрахувати довжину хвилі λ_p та визначити умови збудження хвилі.

Швидкість поширення імпульсу уздовж пластини визначає групова швидкість C_g .

Антисиметрична нульова мода нормальної хвилі називається згинною хвилею.

Згинна хвиля є нерухомою хвилею і має так звані вузли і пучності. Така хвиля, очевидно, виникає завдяки інтерференції падаючої від випромінювача та відбитої краєм пластинки хвиль, що біжать.

Теорія випромінювання і поширення звуку в пластинах показує, що в пластині поширюється згинна хвиля, швидкість якої визначається формулою:

$$C_{зг} = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} = \sqrt{\pi d f} \cdot \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}, \quad (6.1)$$

де d – товщина пластини, λ – довжина згинної хвилі, f – частота згинної хвилі, ρ – густина матеріалу пластини, E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона.

Згинна хвиля збуджується вібратором, що коливається у напрямку, перпендикулярному до площини пластини, тому здається, що згинна хвиля поперечна. Але як показує теорія і експеримент, згинна хвиля одночасно і поздовжня і поперечна. Тільки уздовж середнього перетину пластини поширюється чисто поперечна хвиля (рис. 6.2).

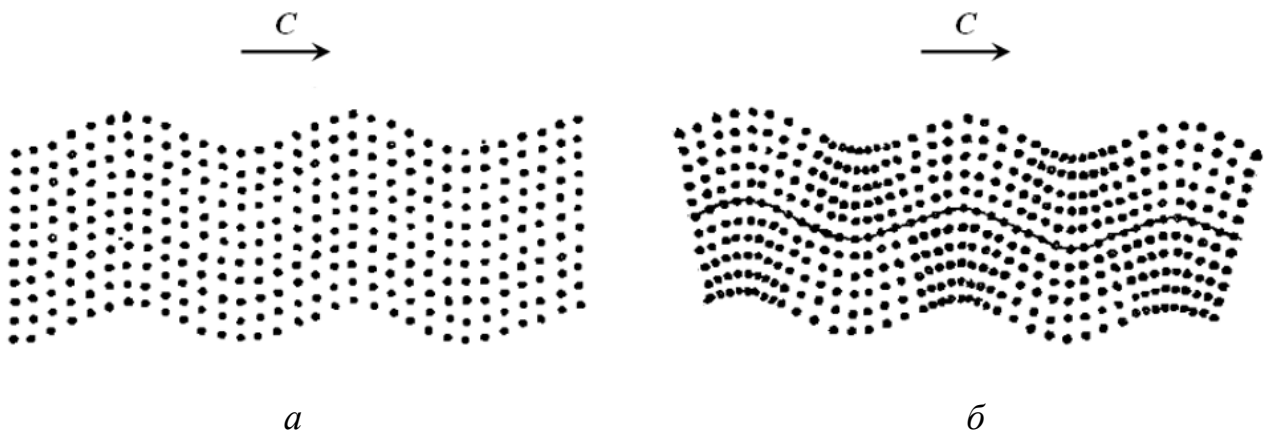


Рис. 6.2. Схематичні зображення поперечної та згинної хвиль:

а – у поперечній хвилі коливання часток твердого тіла відбуваються в напрямку, строго перпендикулярному до напрямку поширення хвилі;

б – згинна хвиля одночасно поздовжня та поперечна: частки пластинки, у якій поширюється хвиля, роблять складний коливальний рух, що має складові, перпендикулярні і паралельні до напрямку поширення хвилі; чисто поперечна хвиля, як показує схематичний малюнок, поширюється тільки вздовж середнього перетину пластинки.

З виразу (6.1) слідує, що швидкість поширення згинної хвилі $C_{зг}$ залежить від частоти (це явище називається дисперсією швидкості звуку):

$$C_{зг} \sim \sqrt{f}$$

або

$$\lambda_{зг} \sim \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (6.2)$$

6.1.2. Магнітострикційний ефект

Магнітострикція являє собою деформування тіл при зміні їхнього магнітного стану. Дане явище, відкрите в 1842 р. Джоулем, властиво феромагнітним металам і сплавам (*феромагнетикам*) та феритам.

Властивості феромагнетиків характеризуються кривою намагнічування $B=f(H)$. При збільшенні напруженості магнітного поля індукція росте до певного значення, обумовленого явищем насичення. При знятті зовнішнього поля у феромагнетику зберігається *залишкова індукція* $B_{\text{зал}}$ і для його повного розмагнічування необхідно створити поле протилежного напрямку. Напруженість поля, при якому індукція дорівнює нулю, називають *коерцитивною силою* H_k . Замкнуту криву, що характеризує запізнювання зміни магнітної індукції стосовно зміни напруженості зовнішнього магнітного поля, називають *петлею гістерезису* (рис. 6.3).

Магнітна енергія кристалічної решітки є функцією відстані між атомами або іонами; отже, зміна магнітного стану тіла веде до його деформування, тобто виникає явище *магнітострикції*.

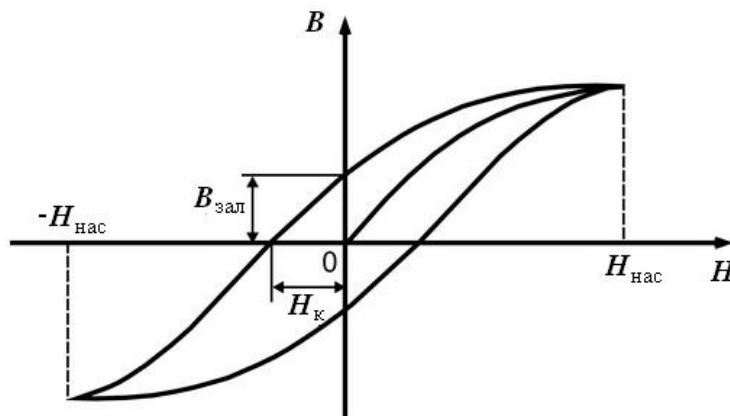


Рис. 6.3. Загальний вигляд петлі гістерезису для феромагнетиків

Магнітострикційна деформація $\varepsilon = \Delta l / l$ (де Δl – абсолютне подовження зразка, l – його довжина) складним чином залежить від індукції та напруженості магнітного поля, оскільки ця залежність визначається характером доменної структури. У найпростіших випадках деформація пропорційна квадрату

намагніченості. Для макроскопічно однорідних полікристалічних речовин деформація може бути розрахована шляхом усереднення доменних ефектів з урахуванням напрямку векторів J , H та напрямку вимірювання. Оскільки деформація феромагнітного зразка визначається тільки модулем зовнішнього магнітного поля, то при накладенні знакозмінного поля із частотою зміни f розміри зразка змінюються від мінімального до максимального значень двічі за період (за кожен півперіод зразок відчуває весь цикл «подовження-укорочення»), тобто із частотою $2f$, як показано на рис. 6.4а.

В магнітострикційних перетворювачах використовують магнітополяризований матеріал, що має постійну складову індукції B_0 , створювану постійним магнітом, залишковою намагніченістю або за рахунок постійного струму в обмотці підмагнічування. При наявності в зразку змінної складової індукції, що менша за постійну, сумарний напрямок поля не змінюється і відбувається утворення механічних коливань із частотою збуджуючого поля, як показано на рис. 6.4б.

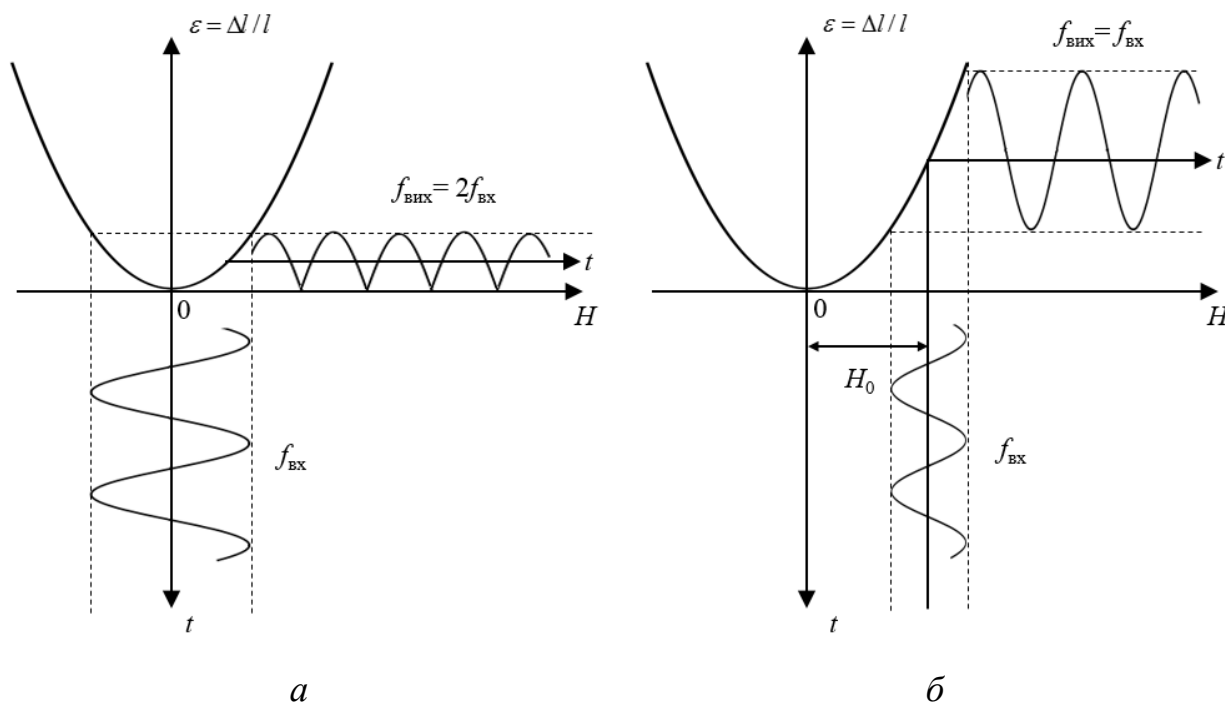


Рис. 6.4. Залежність деформації від напруженості зовнішнього магнітного поля:

a – без підмагнічування; *б* – з додатковим підмагнічуванням H_0

Амплітуда коливань стрижня-вібратора залежить не тільки від фізичних властивостей конкретного феромагнетика, а й від пружності твердого тіла, з якого виготовлений стрижень. Загалом амплітуда акустичних коливань незначна і обчислюється мікронами, але й цього достатньо для створення високоефективних ультразвукових технологічних установок.

Як матеріал для магнітострикційного перетворювача (вібратора) серед металів-феромагнетиків нікель володіє найкращими магнітострикційними властивостями, проте існують і інші матеріали на основі інтерметалевих сполук: альфер (сплав Fe і Al (13%)), пермалой (сплав Fe і Ni (40%)), альсифер (сплав Fe і Al (4%), Si (2%)), пермендюр (сплав Fe і Co (49%), V (2%)), інвар (сплав Fe (64%) і Ni (36%)), цекас (сплав Fe (26,9%), Ni (59,9%), Cr (11,2%), Mn (2%)).

Альтернативою перерахованим вище матеріалам є феритова кераміка. Перевага феритового вібратора в тому, що у нього втрати на вихрові струми значно нижче, ніж у металевого вібратора, що дозволяє використовувати монолітні феритові вібратори на високих частотах ультразвуку. Якщо металевий вібратор при тривалій роботі вимагає водяного охолодження, то феритовий вібратор здатний генерувати ультразвук за температури до 500°C. Однак ферит не витримує потужних ультразвукових вібрацій і його застосування обмежене.

6.1.3. Магнітострикційний перетворювач

На рис. 6.5 показана одна із конструкцій магнітострикційного випромінювача на основі феритового стрижня.

У феритових випромінювачах для підмагнічування зазвичай застосовують постійні магніти, а у металевих випромінювачах використовують підмагнічування постійним струмом, що проходить через обмотку збудження вібратора або додаткову обмотку підмагнічування. Принципового значення джерело підмагнічування не має. У будь-якому випадку, для конкретного вібратора існує оптимальна величина магнітного поля, при якій досягається максимальна амплітуда ультразвукових коливань.

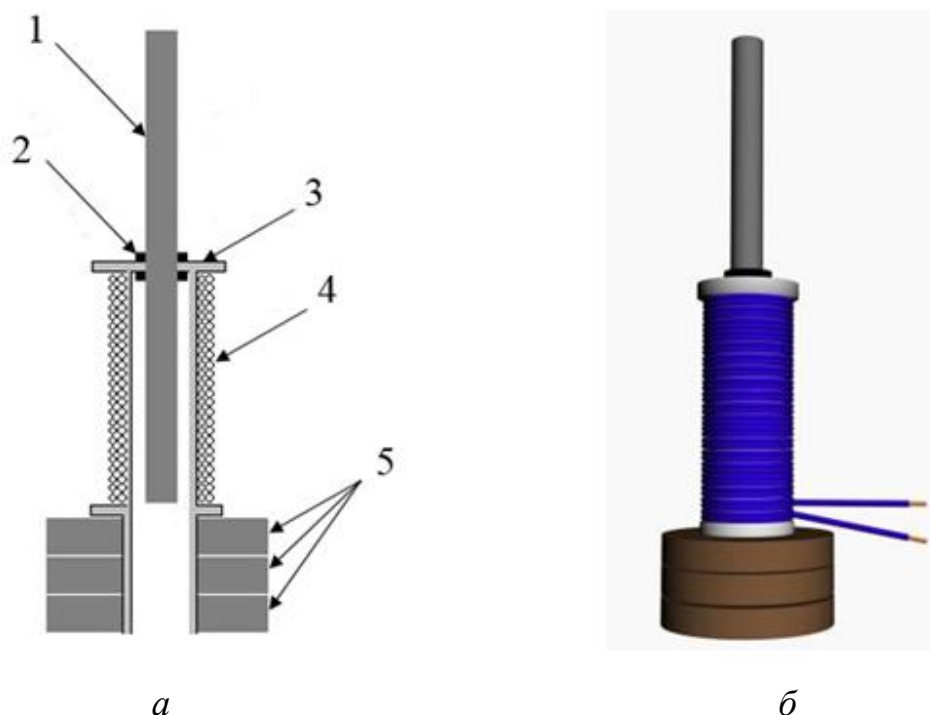


Рис. 6.5. Магнітострикційний випромінювач: *а* – конструкція: 1 – феритовий стрижень, 2 – гумове кільце, 3 – каркас обмотки збудження, 4 – обмотка збудження, 5 – кільцеві магніти; *б* – тривимірна модель

6.2. Лабораторний стенд

Магнітострикційний перетворювач є феритовим стрижнем-резонатором, власна частота коливань якого на першій гармоніці розраховується за формулою:

$$f = \frac{C_l}{2 \cdot l}, \quad (6.3)$$

де C_l – швидкість поширення поздовжніх хвиль у феритовому стрижні, l – довжина стрижня.

У стрижні збуджується поздовжня хвиля, швидкість якої можна розрахувати за формулою:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Схема макету ультразвукового генератора (рис. 6.6) включає генератор змінного струму для збудження магнітострикційного перетворювача, магніт для постійного підмагнічування стрижня, соленоїд для створення змінного магнітного поля в закріпленому в ньому феритовому стрижні.

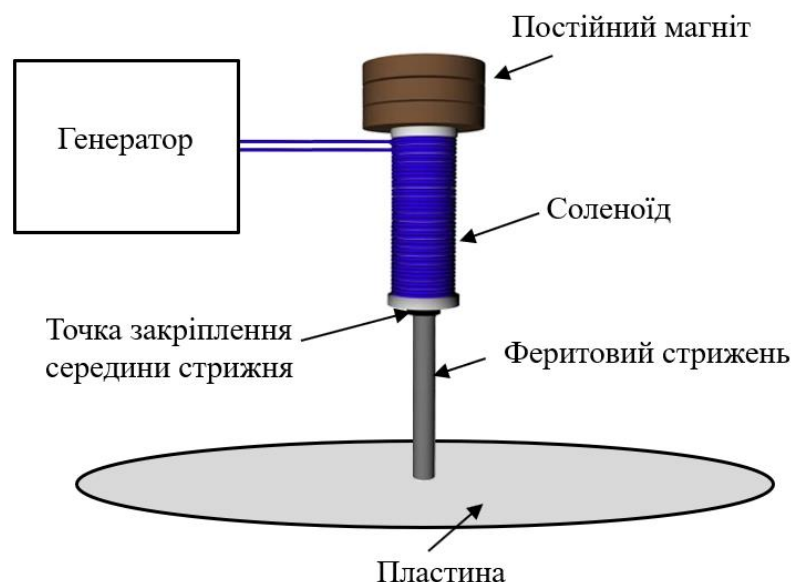


Рис. 6.6. Схема макету ультразвукового магнітострикційного генератора

Збудження згинних хвиль в пластині здійснюється через механічний контакт між перетворювачем і пластиною. Для збудження магнітострикційного перетворювача на першій гармоніці необхідно, щоб феритовий стрижень закріплювався в соленоїді через коротку циліндрову прокладку, розташовану на відстані $l/2$ від краю стрижня.

Пластини O виконані у вигляді різних плоских фігур завтовшки 0,5–2 мм. Візуалізація нерухомої хвилі здійснюється за допомогою піску (або дрібної солі), заздалегідь розсипаного на пластині рівним тонким шаром.

Оскільки межа розділу між пластиною і навколишнім середовищем «м'яка», то край пластини знаходиться в пучності коливальної швидкості. Рівномірно розсипаний по поверхні пластини пісок (або сіль) збирається у вузлах коливальної швидкості, проявляючи інтерференційну картину ультразвукового поля. Відстань між сусідніми вузлами коливальної швидкості дорівнює половині

довжини згинної хвилі (рис. 6.7). Якщо пластина має форму диска, то інтерференційна картина має вид концентричних кіл, відстані між якими дорівнюють $\lambda/2$.

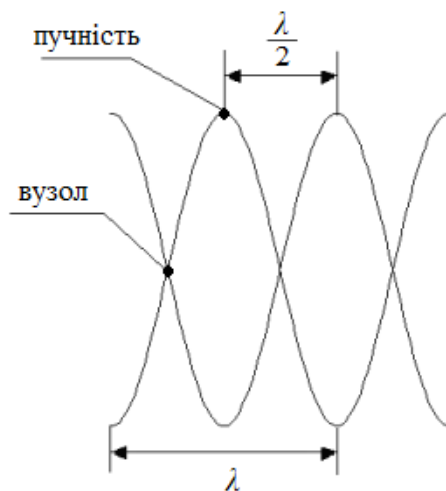


Рис. 6.7. Форма згинної ультразвукової хвилі

Внаслідок того, що віддзеркалення хвилі відбувається від акустично менш щільного середовища, на краю пластини повинна утворитись пучність зміщень нерухомої хвилі. Оскільки відстань між сусідніми вузлами дорівнює половині довжини хвилі ультразвуку в пластинці, то перший вузол – у повній відповідності з теорією – утвориться на відстані чверті довжини хвилі від краю пластинки.

Якщо підставити вираз (6.3) у (6.2), отримаємо, що $\lambda_{зг} \sim \sqrt{l}$.

6.3. Експериментальна частина

Ознайомитися із загальними положеннями і схемою магнітострикційного вібратора (рис. 6.5).

Розрахувати приблизно резонансні частоти на першій гармоніці за формулою (6.3) для феритових стрижнів різних довжин, що використовуються в

лабораторній роботі. Швидкість ультразвуку в феритовому стрижні визначити зі спеціальних таблиць (дивись у [2,3,5]).

Зібрати схему макету (рис. 6.5 та 6.6) і налаштувати перетворювач «на резонанс». Резонанс визначають наступним чином: 1) фіксують стрижень приблизно посередині за допомогою гумового кільця; 2) зібраний перетворювач ставлять перпендикулярно до поверхні; 3) на верхній край стрижня кладуть тонку металеву пластинку (наприклад, це може бути лезо від бритви); 4) на генераторі виставляють частоту, що була попередньо розрахована як частота резонансу; 5) за допомогою елементів керування генератора починають плавно змінювати частоту до тих пір, поки лезо не почне максимально вібрувати на краю стрижня (це можна відчувати на слух за характерним звуком або спостерігати візуально, наприклад, коли лезо «зістрибне» з краю стрижня). Визначена таким чином частота і буде реальною частотою резонансу.

Уточнити швидкість звуку в матеріалі магнітострикційного перетворювача, враховуючи налаштовану резонансну частоту.

Підготувати пластини різної форми (видаються викладачем) для збудження в них згинних хвиль. На пластину нанести тонкий шар піску або солі.

Збудити в пластині у вигляді диску нерухому згинну хвилю (від центра диску). Зафіксувати фрагмент інтерференційної картини (наприклад, сфотографувавши на телефон). Розрахувати довжину нерухомої хвилі, вимірявши спочатку відстань між двома сусідніми вузлами за допомогою штангенциркуля (див. рис. 6.7). Дані занести у таблицю 6.1.

За наявності декількох стрижнів різної довжини повторити дії, описані у попередніх абзацах. Також побудувати графік залежності довжини згинної хвилі від довжини збуджуючого феритового стрижня.

Проаналізувати інтерференційну картину при введенні звуку в стороні від центру диска. Отримані картини сфотографувати.

Для пластин інших форм, що відмінні від дискової, не потрібно розраховувати швидкість згинних хвиль. Для цих пластин просто збуджувати

хвилю в різних точках на їх поверхні, а отримані інтерференційні картини сфотографувати.

Зробити висновки.

6.4. Оформлення експериментальних результатів

Таблицю 6.1 оформити в електронному вигляді і роздрукувати. Сфотографовані фрагменти інтерференційних картин роздрукувати на окремих аркушах і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

Табл. 6.1 Результати дослідження дисперсії швидкості з використанням пластин у вигляді диску

Довжина феритового стрижня l , мм	Розрахована частота резонансу феритового стрижня f , кГц	Налаштована частота резонансу феритового стрижня f , кГц	Довжина згинної хвилі в пластині λ , мм

6.5. Контрольні запитання

1. Пояснити явище магнітострикції.
2. Чим визначається резонансна частота магнітострикційного перетворювача?
3. Чому розрахована частота резонансу відрізняється від налаштованої частоти резонансу?
4. Як закріпити стрижневий перетворювач, щоб отримати коливання на 2, 3 або 4 гармоніці?
5. Пояснити положення вузлів і пучностей коливальної швидкості на інтерференційній картині, зокрема, на краю диска.

6. Як пояснити явище дисперсії швидкості згинних хвиль?

7. Як залежить деформація магнітострикційного стрижня від напруженості зовнішнього магнітного поля без постійного підмагнічування та із ним?

Список використаних джерел для лабораторної роботи №6

1. Кайно Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов: пер. с англ. / Г. Кайно. – М.: Мир, 1990. – 656 с.

2. Ермолов И.Н. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В.Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.

3. Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

4. Майер В.В. Простые опыты с ультразвуком / В.В Майер. – М.: Наука, 1978. – 160 с.

5. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.

Лабораторна робота № 7

ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕНOSTІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Мета роботи: дослідити структуру акустичного поля плоского круглого p -єзоперетворювача; ознайомитись з методами вимірювання діаграми направленості ультразвукових перетворювачів в дальній зоні акустичного поля.

7.1. Основні положення

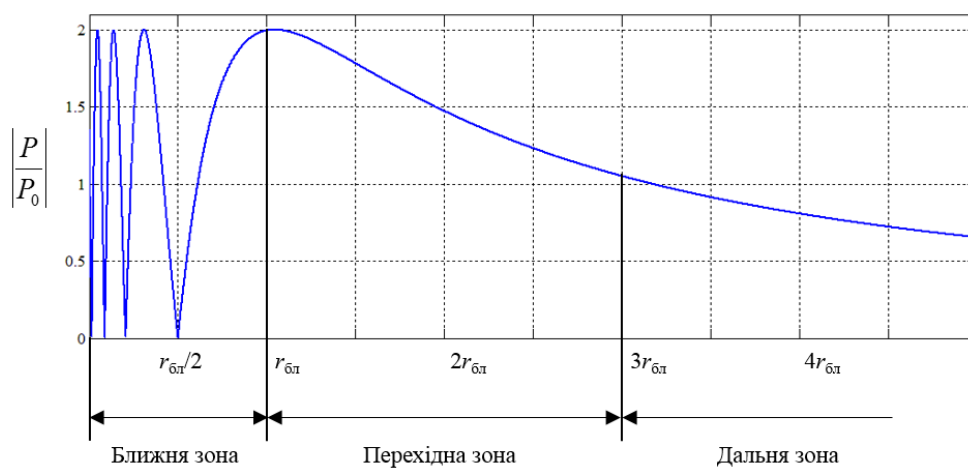
Для дослідження характеристик розподілу акустичного тиску, який створюється ультразвуковим перетворювачем в об'єкті контролю (ОК), використовують два підходи. Перший підхід полягає у дослідженні тільки поля випромінювання за допомогою мініатюрного, в ідеальному випадку точкового, приймача. Другий підхід передбачає зняття характеристик поля випромінювання-приймання на основі вимірювання амплітуди та фази віддзеркаленої від мініатюрного об'єкту, що має кругову діаграму направленості (ДН), ультразвукової хвилі. Між характеристиками, знятими цими способами, існує залежність – квадрат розподілу поля випромінювання рівний розподілу поля випромінювання-приймання.

В акустичному полі будь-якого перетворювача внаслідок активних інтерференційних процесів утворюються дві характерні зони: ближня і дальня (рис. 7.1).

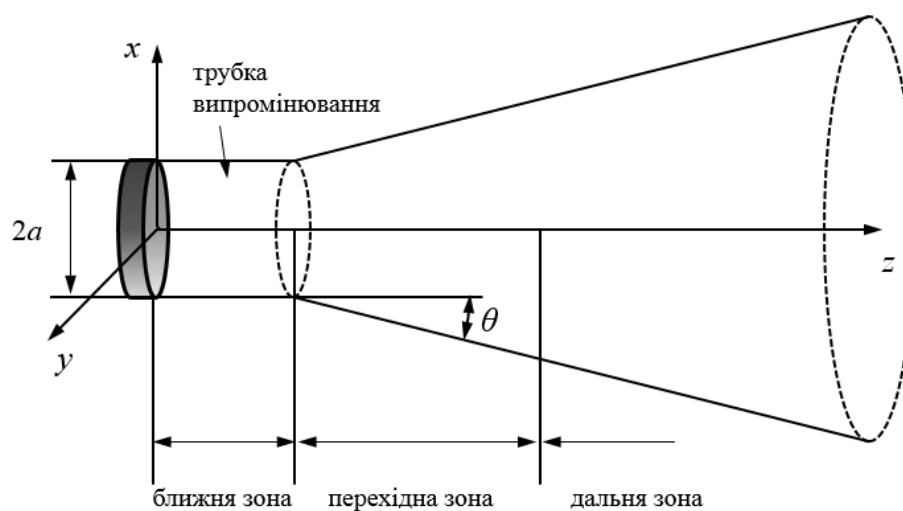
Для поршневого випромінювача круглої форми глибина ближньої зони розраховується за формулою:

$$r_{\text{бл}} = \frac{a^2}{\lambda}, \quad (7.1)$$

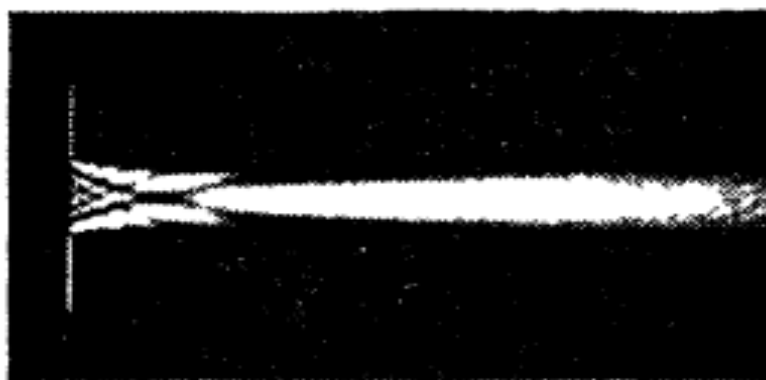
де a – радіус випромінювача, λ – довжина хвилі в середовищі її поширення.



a



б



в

Рис. 7.1. Зони випромінювання: *a* – розподіл акустичного тиску вздовж осі, *б* – схематичне об’ємне зображення акустичного поля круглого п’єзоперетворювача, *в* – фотографія ультразвукового поля випромінювача

Початок дальньої зони визначається з умови:

$$r_d \geq 3r_{bl} = 3 \frac{a^2}{\lambda} \quad (7.2)$$

Між ближньою та дальньою зонами розташована проміжна або перехідна зона.

Аналіз формул (7.1) та (7.2) показує, що зони акустичного поля випромінювача залежать від його поперечних розмірів і товщини (оскільки товщина визначає резонансну частоту, від якої залежить довжина хвилі в ОК).

Якщо випромінювач працює в поршневому режимі, то у ближній зоні поширюється плоска хвиля. У ближній зоні (зоні Френеля) переважає явище інтерференції з явно вираженими нулями і пучностями, а хвиля у цій зоні не розходить і перетин пучка визначається конфігурацією плоского випромінювача. У ближній зоні випромінювача поле спрощено можна представити у вигляді променевої трубки із границею за ізобарою (лінією, що з'єднує точки з рівним звуковим тиском), діаметр якої дорівнює діаметру п'єзоелементу $2a$ (див. рис. 7.1б). У цій променевій трубці зосереджена основна випромінювана енергія, проте не уся.

У дальній зоні акустичний тиск монотонно зменшується за законом зворотної пропорційності до відстані, що характерний для сферичної хвилі. Якщо у ближній зоні основна частина акустичної енергії розповсюджується в трубці випромінювання, то в дальній зоні основна енергія розповсюджується в конусі випромінювання. Характерною особливістю дальньої зони є те, що хвиля із плоскої у ближній зоні перетворюється у сферичну в дальній.

Для дискового випромінювача закон зміни амплітуди тиску вздовж акустичної осі може бути представлений виразом:

$$P = 2P_0 \cdot \sin\left(\frac{k}{2} \cdot \left(\sqrt{z^2 + a^2} - z\right)\right) = 2\rho C v_0 \cdot \sin\left(\frac{k}{2} \cdot \left(\sqrt{z^2 + a^2} - z\right)\right),$$

де P_0 – амплітуда акустичного тиску, v_0 – амплітуда коливальної швидкості поверхні випромінювача, ρ – густина середовища, C – швидкість поширення ультразвуку у деякому середовищі, k – хвильове число, z – відстань вздовж осі.

Виникнення екстремумів тиску на осі у ближній зоні (рис. 7.1а) пояснюється тим, що у кожному точку простору поблизу п'єзоелементу хвилі, випроменені різними його ділянками, приходять у різний час і з різними фазами, та інтерферують (додаються) з урахуванням набігу фаз. Тому у межах ближньої зони звуковий тиск P осцилює не тільки вздовж осі, але й в усьому об'ємі циліндра діаметром $2a$ (див. рис. 7.1б).

При $z > r_{\text{бл}}$ інтерференційні явища на осі випромінювача слабшають, а при $z > 3r_{\text{бл}}$ практично відсутні. Цю область називають дальньою зоною або зоною Фраунгофера. У цій зоні хвилі, що випроменені всіма ділянками п'єзоелементу, приходять у кожному точку простору практично в одній фазі. Але у межах однієї фази (тобто, у межах $\lambda/2$) амплітуди цих хвиль змінюються від 0 до 1. Тому в ній пучок розширюється, а звуковий тиск P_θ у пучку в напрямку під кутом θ до акустичної осі монотонно зменшується уздовж і поперек акустичної осі відповідно до виразу:

$$\frac{P_\theta}{P_0} = \frac{S_a}{\lambda z} \cdot R(\theta)$$

де S_a – площа випромінювача.

У цьому виразі член $S_a/\lambda z$, що називається дифракційним, характеризує послаблення інтенсивності пучка вздовж осі внаслідок його розходження по конусу (рис. 7.1б). Другий член $R(\theta)$ є характеристикою (діаграмою) направленості і визначає розподіл акустичного тиску в поперечному перерізі (вздовж фронту хвилі) щодо тиску на осі, який прийнятий за 100% (рис. 7.2).

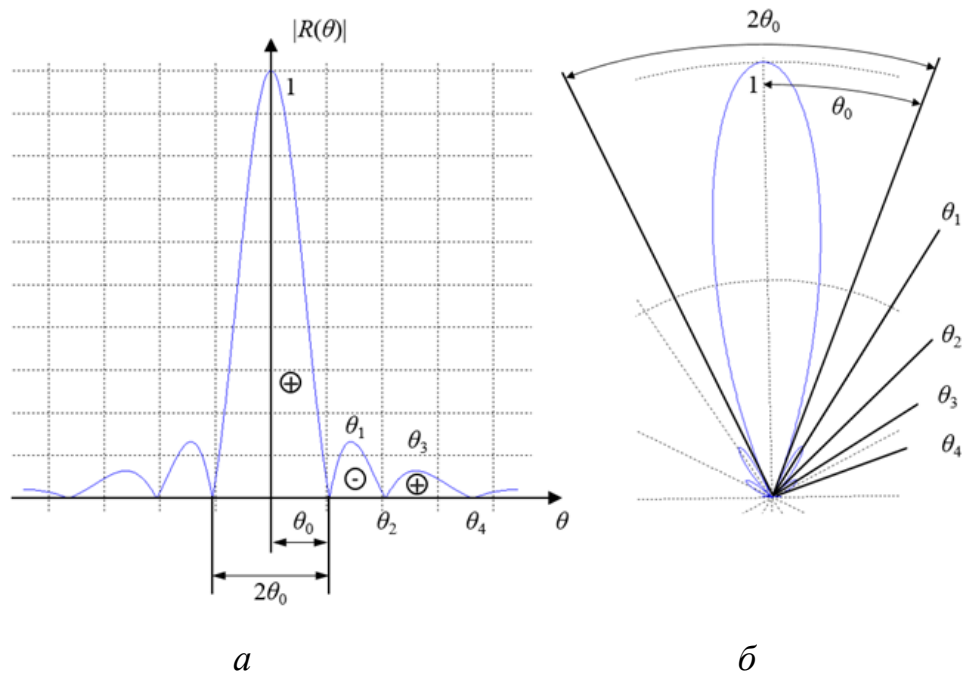


Рис. 7.2. Діаграма направленості дискового перетворювача:
 a – у декартовій; b – у сферичній системі координат

Діаграма направленості – це векторна діаграма кутового розподілу енергії поля випромінювача. Тобто, в ній довжина вектора (променя під деяким кутом θ до осі пучка) пропорційна енергії випромінювання в цьому напрямку щодо енергії уздовж осі. Тому, від однакових відбивачів, які розташовані на одній відстані z , фіксуються різні за амплітудою сигнали (рис. 7.3).

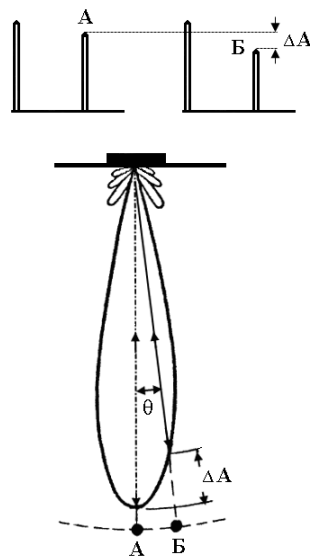


Рис. 7.3. Зміна амплітуди сигналу від положення відбивача у межах ДН

Діаграма направленості складається з декількох пелюсток (рис. 7.2б). Чим вище частота f або більше радіус п'єзопластини a , тим пелюсток більше.

У дальній зоні дискового випромінювача діаметром $2a$ акустичне поле вісесиметричне. Діаграма направленості в будь-якій з площин розраховується за формулою:

$$R(\theta) = \frac{2 \cdot J_1(a \cdot k \cdot \sin \theta)}{a \cdot k \cdot \sin \theta}, \quad (7.3)$$

де J_1 – це функція Бесселя 1-го роду 1-го порядку, нулі якої (рис. 7.2а) відповідають нулям ДН, k – хвильове число.

Кут θ_0 , при якому функція $R(\theta)$ перетворюється в нуль перший раз, називається кутом розхилу (розкриву) ДН:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{1,22\pi}{a \cdot k} = \arcsin \frac{1,22}{L},$$

де $L = \frac{2a}{\lambda}$ – хвильовий розмір випромінювача.

Другий кут, при якому ДН перетворюється в нуль, визначається як:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{2,22}{L}$$

Третій кут, при якому ДН перетворюється в нуль, визначається як:

$$\theta_4 = \arcsin \frac{3,24}{L}$$

Діаграма направленості прямокутного випромінювача в осьовій площині (вертикальній або горизонтальній), яка є паралельною стороні прямокутника $2a$ (або $2b$), відповідає виразу:

$$R(\theta) = \frac{\sin(a \cdot k \cdot \sin \theta)}{a \cdot k \cdot \sin \theta}$$

або

$$R(\theta) = \frac{\sin(b \cdot k \cdot \sin \theta)}{b \cdot k \cdot \sin \theta}.$$

Функція $R_a(\theta)$ перетворюється в нуль перший раз при куті:

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\pi}{a \cdot k} = \arcsin \frac{1}{L}$$

Другий раз при куті:

$$\theta_2 = \arcsin \frac{2}{L}$$

Третій раз при куті:

$$\theta_4 = \arcsin \frac{3}{L}$$

Такий самий підхід застосовується під час розрахунку кутів для функції $R_b(\theta)$.

Схема вимірювання ДН представлена на рис. 7.4.

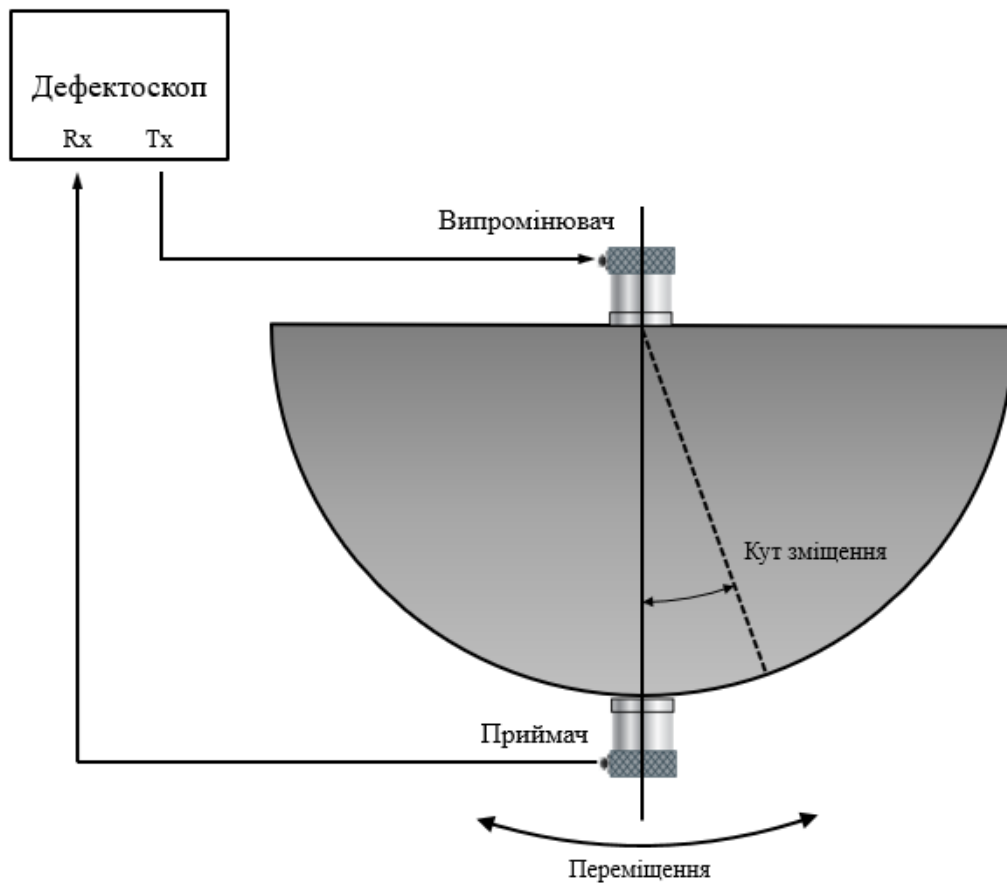


Рис. 7.4. Схема вимірювання

Методика вимірювання полягає в наступному: приймальний перетворювач встановлюють на відстані $z \geq 3r_{\text{бл}}$ від випромінювача. За допомогою

випромінюючого перетворювача вводять в об'єкт поздовжні хвилі. Спочатку встановлюють обидва перетворювачі на одній акустичній осі і фіксують амплітуду сигналу на приймачі за допомогою ультразвукового дефектоскопу. Далі зміщують приймач на деякий кут θ_x відносно акустичної осі і фіксують амплітуду прийнятого сигналу. Потім знову зміщують приймач на певний кут (із заданим кроком) і також фіксують амплітуду прийнятого сигналу.

7.2. Експериментальна частина

Ознайомитися з ДСТУ 23702-79, 14782-76, відповідною літературою та методикою вимірювань.

Для використовуваних п'єзоперетворювачів розрахувати зони випромінювання за формулами (7.1) та (7.2).

Підготувати установку для зняття діаграми направленості (рис. 7.4). Спочатку виміряти амплітуду акустичного тиску A_0 при співвісному положенні випромінювача та приймача. Потім, зміщуючи приймач на фіксований кут θ_i (задає викладач) вліво і вправо вздовж сферичної поверхні ОК, вимірювати амплітуди A_i . Занести результати вимірювань у таблицю 7.1.

Оцінити розхил головної пелюстки ДН на рівні -3 дБ. Для цього встановити співвісно випромінювач і приймач. Встановити коефіцієнт підсилення таким чином, щоб амплітуда прийнятого сигналу становила 75% висоти екрану дефектоскопу. Після цього, не переміщуючи приймач, підсилити сигнал додатково ще на 3 дБ (тобто, амплітуда збільшиться). Далі, зміщуючи приймач ліворуч (праворуч) від осі, зафіксувати кут, при якому прийнятий сигнал зменшиться і знову становитиме 75% висоти екрану. Це і буде кут розхилу головної пелюстки ДН на рівні -3 дБ.

Зробити висновки.

7.3. Оформлення експериментальних результатів

У таблицю 7.1 занести значення кутів, при яких відбувалось вимірювання амплітуди сигналу на приймальному перетворювачі, та виміряні значення амплітуди прийнятого сигналу.

Табл. 7.1. Результати вимірювання ДН

Кут θ_i , град	Амплітуда A_i , відн. од.

Нарисувати експериментальну діаграму направленості в форматі $A_i(\theta_i)/A_0$ (де A_0 – максимальна амплітуда при співвісному положенні випромінювача і приймача) в декартовій системі координат та в сферичній.

За формулою (7.3) побудувати графік ДН для заданих характеристик перетворювача та середовища. Зробити це з використанням математичного пакету MATLAB. Приклад коду наведений на рис. 7.5.

```

1 - a=8e-3; % радіус перетворювача
2 - f=2.5e+6; % робоча частота перетворювача
3 - C=5900; % швидкість ультразвуку в об'єкті контролю
4 - L=C/f; % довжина хвилі в об'єкті контролю
5 - k=2*pi/L; % хвильове число
6 - Q=-pi/2:pi/300:pi/2; % завдання діапазону зміни кутів для побудови ДН
7 - R=(2*besselj(1,a*k*sin(Q))+eps)./(a*k*sin(Q)+eps); % формула для розрахунку ДН
8 - figure;
9 - plot(Q*180/pi,R); % побудова графіка в декартовій системі координат
10 - grid;
11 - xlim([-45 45]); ylim([-0.2 1.01]);
12 - figure;
13 - polar(Q,abs(R)); % побудова графіка в полярній системі координат (за модулем)

```

Рис. 7.5. М-файл з кодом побудови ДН

Результат роботи програми наведено на рис. 7.6.

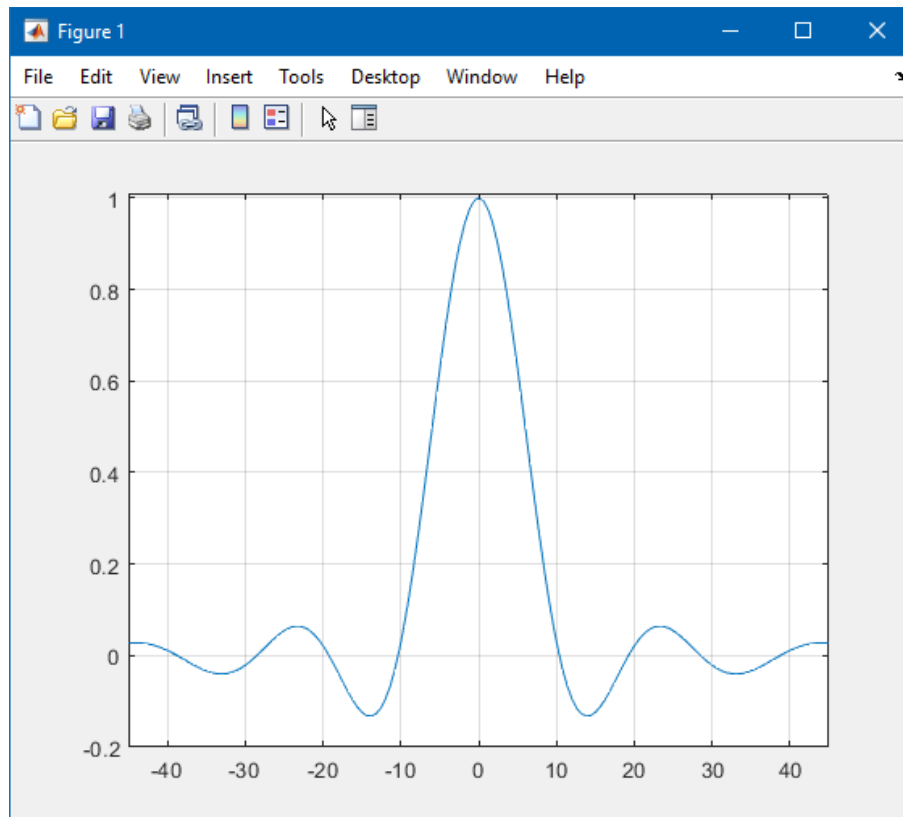


Рис. 7.6. Теоретична ДН круглого перетворювача

Модифікувати вищенаведену програму таким чином, щоб на цьому ж графіку в одному масштабі виводилась і експериментальна ДН, знята під час виконання цієї лабораторної роботи.

Модифікувати вищенаведену програму таким чином, щоб програмно розраховувались для теоретичної кривої ДН кути розхилу на рівні -3дБ та -6дБ, після чого вони би позначались певним маркером на побудованому графіку (рис. 7.7).

Для того, щоб програмно знайти значення відповідних кутів, можна застосувати наступний підхід: створити цикл із лічильником, у якому перевіряти умову, наприклад, перевищення значення ДН заданого рівня (можна задати й зворотну умову – коли значення ДН зменшується до заданого рівня).

Лічильником циклу відповідно буде кут, який змінюється із певним кроком (наприклад, $0,1^\circ$) у заданому діапазоні.

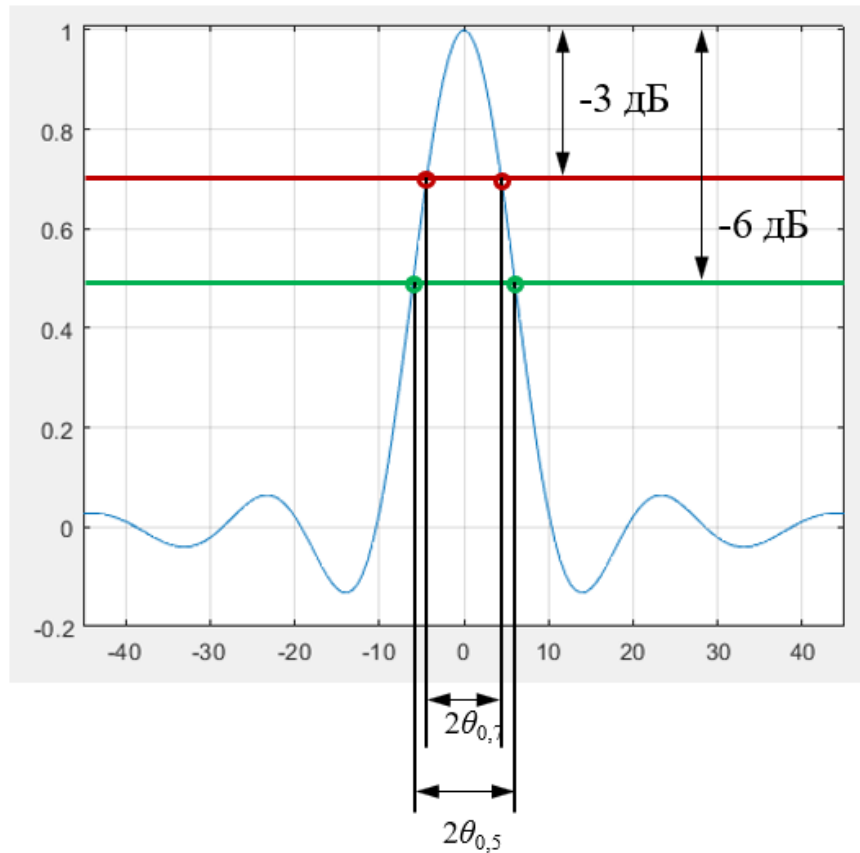


Рис. 7.7. Пояснення, що таке розхил ДН на рівнях -3 дБ та -6 дБ

Таблицю 7.1 та графіки теоретичної і експериментальної ДН роздрукувати на окремих аркушах і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

7.4. Контрольні запитання

1. Поясніть особливості зон поля випромінювання ультразвукового перетворювача та їх межі.
2. Як пов'язана ширина діаграми направленості з геометричними розмірами випромінювача?
3. У чому відмінність діаграм направленості круглого і прямокутного випромінювачів?

4. У чому відмінність діаграм направленості при неперервному та імпульсному режимах випромінювання?

5. Опишіть методику вимірювання ДН?

6. Як розрахувати реальну амплітуду сигналу, якщо відомий коефіцієнт підсилення в децибелах (встановлюється під час налаштування дефектоскопу) і виміряна амплітуда сигналу?

Список використаних джерел для лабораторної роботи №7

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.

2. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В.Г. Щербинский. – М.: «Тиссо», 2003. – 328 с.

3. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под ред В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

4. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.

Лабораторна робота № 8

ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЛУНА-ІМПУЛЬСНОГО ТОВЩИНОМІРА

Мета роботи: ознайомитись з методом ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії, структурною схемою товщиноміра та методикою вимірювання товщини ультразвуковим луна-методом.

8.1. Основні положення

8.1.1. Технологія вимірювання товщини ультразвуковим методом

Під час ультразвукової товщинометрії використовується здатність ультразвукових хвиль повністю віддзеркалюватись від межі «тверде тіло – повітря». Визначення товщини зазвичай здійснюється на основі результатів вимірювання інтервалу часу між зондувальним ультразвуковим імпульсом, який створюється п'єзоперетворювачем, та віддзеркаленим від задньої стінки виробу луна-сигналом. При цьому датчик може мати як суміщену конструкцію, так і роздільно-суміщену.

Ультразвуковим луна-імпульсним методом товщина деякого виробу, що має плоскопаралельні грані, визначається за формулою:

$$H = \frac{Ct}{2}, \quad (8.1)$$

де C – фазова швидкість поздовжніх ультразвукових хвиль, t – інтервал часу між зондувальним та віддзеркаленим від донної поверхні імпульсами.

На рис. 8.1 схематично показано акустичний тракт ультразвукового луна-імпульсного товщиноміра у випадку використання перетворювача, що включений за суміщеною схемою.

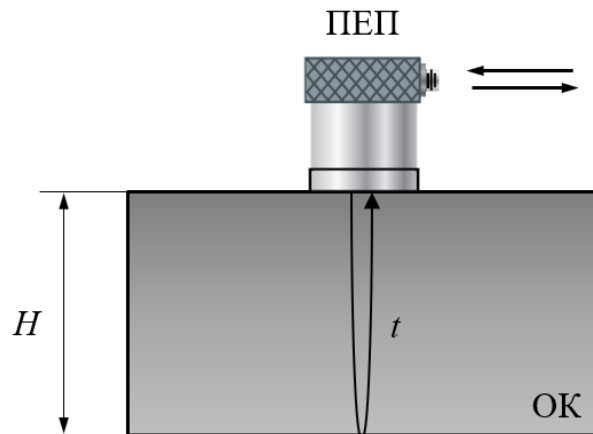


Рис. 8.1 Схема акустичного тракту товщиноміра: H – товщина, t – час

Зазвичай в ультразвукових товщиномірах використовуються роздільно-суміщені перетворювачі, а не суміщені. При використанні в товщиномірах перетворювача, що підключений за роздільно-суміщеною схемою, швидкість також може бути розрахована за формулою (8.1). Проте в даному випадку ця формула буде давати наближений результат, оскільки хвилі у виробі матимуть V-подібний шлях, а довжина такого шляху завжди більша, ніж подвоєне значення товщини.

8.1.2. Поправочні коефіцієнти

Для вимірювання товщини потрібно знати швидкість поширення ультразвуку. Але на практиці користуються зразками відомої товщини, виготовленими з того ж матеріалу, що й об'єкт контролю. Коли ж проводяться вимірювання товщини об'єкта, виготовленого з іншого матеріалу, швидкість звуку в якому відрізняється від швидкості звуку в зразках, то результати вимірювання будуть відрізнятись від істинних.

У цьому випадку необхідно перекалібрувати товщиномір або увести поправочний коефіцієнт:

$$d_{\text{іст}} = K \cdot d_{\text{вимір}},$$

де $d_{\text{іст}}$ та $d_{\text{вимір}}$ – істинне та вимірне товщиноміром значення товщини об’єкта відповідно, K – поправочний коефіцієнт, який визначається експериментально або теоретично для випадку, коли товщиномір відкалібрований по одному матеріалу, а об’єкти, що підлягають вимірюванню, виготовлені з іншого матеріалу.

Справжнє значення товщини $d_{\text{іст}}$ вимірюють в основному за допомогою звичайного штангенциркуля або мікрометра.

Наприклад, під час вимірювання товщини виробів з міді товщиноміром, відкаліброваним на зразках зі сталі, поправочні коефіцієнти визначаються наступним чином:

$$K_{\text{експер}} = \frac{d_{C_{\text{и іст}}}}{d_{C_{\text{и вимір}}}} \text{ (після калібрування по сталі)}, \quad (8.2)$$

$$K_{\text{теорет}} = \frac{C_{C_{\text{и}}}}{C_{\text{ст}}}. \quad (8.3)$$

При визначенні теоретичного коефіцієнту користуються табличними значеннями швидкостей. У даному випадку в знаменнику використовується швидкість $C_{\text{ст}}$, оскільки вище було зазначено, що калібрування відбувалось по сталі. Якщо калібрування відбувалось б по іншому матеріалу, то в знаменнику використовувалось би значення швидкості в тому матеріалі. Загалом, швидкість в знаменнику – це еталонна швидкість, що визначається під час калібрування приладу.

Для зразка з конкретного матеріалу повинна виконуватись приблизна рівність:

$$K_{\text{теорет}} \approx K_{\text{експер}}.$$

Якщо виникає потреба визначити швидкість звуку у деякому матеріалі, то, користуючись попередніми виразами, одержимо формулу:

$$C_x = C_{\text{ст}} \frac{d_{x \text{ іст}}}{d_{x \text{ вимір}}}. \quad (8.4)$$

8.1.3. Способи вимірювання часової затримки

На сьогоднішній день існують різні способи та методи вимірювання часу поширення ультразвуку в ОК, кожен з яких має свої переваги і недоліки, а також характеризується властивою йому граничною похибкою.

Найпростішим є пороговий метод, у якому проміжок часу фіксується у момент перетину сигналами заданого порогового рівня, який, з одного боку, встановлюється вище максимальної амплітуди шуму, а з іншого – таким чином, щоб спрацювання порогового пристрою відбувалось за першим півперіодом віддзеркаленого імпульсу. Фактично, перетин імпульсом порогового рівня визначає момент появи імпульсу. Зрозуміло, що імпульси більшої амплітуди перетинатимуть рівень дискримінації раніше, ніж імпульси меншої амплітуди (рис. 8.2).

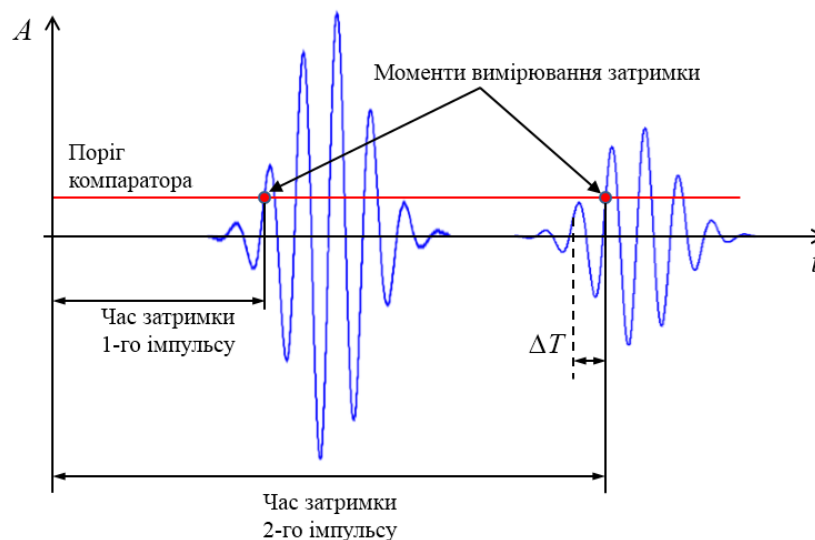


Рис. 8.2. Вимірювання часової затримки з використанням порогового рівня:
 ΔT – похибка вимірювання, обумовлена малою амплітудою прийнятого сигналу
(вимірювання відбувається не по першому додатному півперіоду, а по другому)

Щоб зменшити похибку, обумовлену різною амплітудою прийнятих сигналів в залежності від пройденого шляху, в товщиномірах використовують

схему автоматичного регулювання підсилення, основним завданням якої є приведення амплітуд сигналів із різних глибин до однакового амплітудного рівня.

Іншим способом вимірювання часової затримки є метод перетину нуля (zero-crossing method). Ідея методу полягає у тому, що як тільки прийнятий імпульс перевищує пороговий рівень, прилад фіксує цей момент, проте саме вимірювання затримки проводиться у момент першого переходу через нульове значення після моменту виявлення сигналу (рис. 8.3). Головна перевага цього методу вимірювань полягає в тому, що знайдений час затримки не залежить від амплітуди сигналу. Якщо сигнал перевищив пороговий рівень, вимірювання відбувається автоматично. Таким чином, пристрої, що використовують цей спосіб часової прив'язки, можуть працювати в істотно ширшому динамічному діапазоні, ніж при використанні прив'язки до переднього фронту. Основним чинником, що визначає часову невизначеність методу перетину нуля, є шуми.

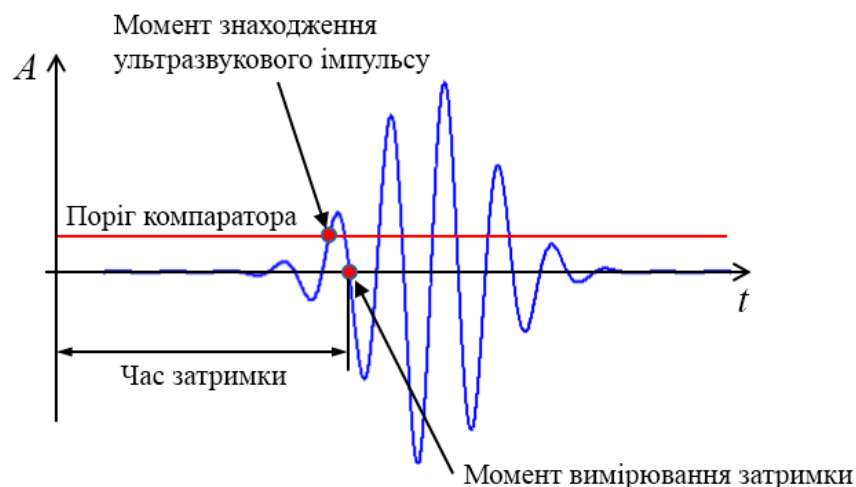


Рис. 8.3. Вимірювання часової затримки методом перетину нуля

Той факт, що час затримки вимірюється не у момент перетину порогового рівня, а через певну частину періоду при перетині нуля, призводить до появи систематичної похибки. Проте цієї похибки позбуваються під час операції установки нуля датчика товщиноміра.

8.3. Оцінка результатів багатократних вимірювань

Процес будь-якого вимірювання (у тому числі і вимірювання товщини) супроводжується впливом значної кількості факторів, що призводять до виникнення похибки. Якщо на результат впливають випадкові похибки, то для зменшення їх впливу на кінцевий результат використовують різні статистичні методи. Статистичні методи застосовуються до набору даних, це означає, що потрібно спочатку виконати багатократні вимірювання тієї чи іншої величини, а вже по тім до отриманих даних застосувати обробку.

Якщо говорити про вимірювання товщини, то найпростіша статистична обробка полягатиме у наступному:

1. Знаходимо середнє арифметичне вимірюваної величини:

$$M = \frac{\sum_{k=1}^k d_k}{k} . \quad (8.5)$$

2. Знаходимо залишкові похибки кожного вимірювання:

$$v_k = d_k - M . \quad (8.6)$$

3. Визначаємо середньоквадратичну похибку вимірюваної величини за результатами ряду вимірювань:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^k v_k^2}{k-1}} . \quad (8.7)$$

4. Зважаючи на те, що похибки розподілені за нормальним законом, знаходимо межу похибки ряду вимірювань:

$$\Delta_{\text{гр}} = 3\sigma . \quad (8.8)$$

5. Знаходимо граничні відносні похибки результатів прямих вимірювань:

$$\delta_{\text{гр}} = \frac{\Delta_{\text{гр}}}{M} . \quad (8.9)$$

6. Знаходимо граничну відносну похибку результату непрямого вимірювання за формулою:

$$\delta_{\text{гр}\Sigma} = \sqrt{\sum_1^m \delta_i^2} = \sqrt{\delta_{\text{гр іст}}^2 + \delta_{\text{гр вимір}}^2} . \quad (8.10)$$

8.2. Експериментальна частина

Ознайомитись з описом використовуваного луна-імпульсного ультразвукового товщиноміра, який можна отримати у викладача.

Відкалібрувати товщиномір згідно з інструкцією з експлуатації (у сучасних товщиномірах калібрування в основному відбувається по зразках зі сталі).

Визначити експериментальні поправочні коефіцієнти для заданих зразків (табл. 8.1). Зразки видаються викладачем і є плоскопаралельними об'єктами різної товщини.

Розрахувати теоретичні поправочні коефіцієнти для матеріалів заданих зразків (табл. 8.1). Під час розрахунку теоретичних поправочних коефіцієнтів швидкості ультразвукових поздовжніх хвиль у відповідних матеріалах взяти із спеціальних таблиць, які є в літературних джерелах до цієї лабораторної роботи. При цьому як еталонну швидкість використати швидкість, що була занесена в пам'ять використовуваного ультразвукового товщиноміра під час його калібрування.

Визначити швидкість ультразвуку в заданому «невідомому» матеріалі за сукупністю вимірювань (табл. 8.2). На основі розрахованого значення швидкості з'ясувати за допомогою відповідних довідникових даних, який це матеріал.

Оцінити похибку вимірювання швидкості за сукупністю вимірювань (табл. 8.2).

Отримати у викладача файл **Signal.xlsx**, що містить змодельовані форми ультразвукового зондувального та віддзеркаленого сигналів вздовж часової

розгортки. В середовищі MathCad, або MATLAB, або LabView (або іншому зручному для вас середовищі програмування) написати програму, яка дозволяла б обробляти ці сигнали для визначення часової затримки між ними. Програмно реалізувати вимірювання часової затримки наступними методами: за встановленим пороговим рівнем та методом Zero-Crossing. Вважати, що початок відліку часу $t=0$ на часовій розгортці відповідає початку зондувального імпульсу. Це означає, що вимірювання часової затримки у такому випадку зводиться лише до визначення часу початку віддзеркаленого імпульсу. Під час реалізації методу із встановленим пороговим рівнем величину цього рівня обрати самостійно таким чином, щоб він, з одного боку, був більшим за рівень шумів, а з іншого – не перевищував амплітуду першого півперіоду віддзеркаленого імпульсу.

8.4. Оформлення експериментальних результатів

Розрахувати значення поправочних коефіцієнтів за формулами (8.2), (8.3) та значення швидкості у досліджуваному зразку за формулою (8.4). Результати занести у таблицю 8.1.

Табл. 8.1 Визначення поправочних коефіцієнтів

№	Матеріал	$d_{\text{іст}}$, мм	$d_{\text{вимір}}$, мм	$K_{\text{експ}}$	$C_{\text{табл}}$, м/с	$K_{\text{теор}}$	C_x , м/с
1	Алюміній						
2	Мідь						
3	Латунь						
4							
5							

Під час визначення швидкості ультразвуку в «невідомому» матеріалі вимірювання проводити у 7-ми різних точках на поверхні зразка. Результати занести у таблицю 8.2. Для розрахунків використовувати формули (8.5) - (8.10).

Табл. 8.2 Визначення швидкості звуку в «невідомому» матеріалі

№ вимірювання	$d_{\text{іст}},$ мм	$v_{\text{k іст}},$ мм	$v_{\text{k іст}}^2$ мм ²	$d_{\text{вимір}},$ мм	$v_{\text{k вимір}},$ мм	$v_{\text{k вимір}}^2$ мм ²
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Середнє арифметичне:

- за результатами вимірювання за допомогою штангенциркуля $M_{\text{іст}} =$
- за результатами вимірювання за допомогою товщиноміра $M_{\text{вимір}} =$

Очікувана величина швидкості звуку в «невідомому» матеріалі, яка одержана шляхом непрямих вимірювань, буде визначатись як:

$$C_x = M_{C_x} (1 \pm \delta_{\text{гр}\Sigma}),$$

де M_{C_x} – середнє значення швидкості, що визначається як:

$$M_{C_x} = C_{\text{ет}} \frac{M_{\text{іст}}}{M_{\text{вимір}}},$$

де $C_{\text{ет}}$ – швидкість, що визначена під час калібрування приладу і занесена у пам'ять приладу,

Таблиці 8.1 та 8.2 роздрукувати на окремих аркушах та прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

8.5. Контрольні запитання

1. У чому полягає операція калібрування ультразвукового товщиноміра?

2. В який бік від істинного значення відхиляться показання товщиноміра, відкаліброваного по алюмінію, якщо вимірюється товщина об'єкта з оргскла?
3. Як визначити швидкість ультразвуку в невідомому матеріалі за допомогою луна-імпульсного товщиноміра?
4. Докладно опишіть основні складові похибки вимірювання товщини за допомогою ультразвукового товщиноміра.
5. Які існують методи вимірювання товщини за допомогою ультразвуку? Поясніть кожен метод.
6. опишіть способи вимірювання часової затримки між зондувальним та прийнятим донними сигналами, що реалізуються в сучасних товщиномірах.

Список використаних джерел для лабораторної роботи №8

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
2. Коротков М.М. Ультразвуковая толщинометрия: учеб. пособие / М.М. Коротков. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 94 с.
3. Королев М.В. Эхоимпульсные толщинометры / М.В. Королев. – М.: Машиностроение, 1980. – 111 с.
4. Ермолов И.Н. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.
5. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.
6. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд.: пер. с нем. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

Лабораторна робота № 9

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛУНА-ІМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОСКОПА

Мета роботи: ознайомитись з принципом дії та схемою луна-імпульсного дефектоскопа; здобути навички роботи з луна-імпульсним дефектоскопом для виявлення дефектів, визначення їх координат і розмірів.

9.1. Основні положення

Луна-імпульсний метод дефектоскопії заснований на прозвучуванні виробу короткими імпульсами ультразвукових коливань і реєстрації луна-сигналів, віддзеркалених від дефектів. Випромінювані імпульси 1 (рис. 9.1) називаються зондувальними. Імпульс 2, відбитий від протилежної поверхні виробу, називають донним. За наявності у виробі дефекту з'являється проміжний імпульс 3, розташований між зондувальним імпульсом та донним.

За розташуванням імпульсу від дефекту на лінії розгортки екрана дефектоскопу та його амплітудою судять про глибину залягання дефекту та розміри. Оскільки поява імпульсу уздовж розгортки пропорційна пройденому ультразвуком шляху, то відстань до дефекту H , тобто глибина його залягання, визначається за формулою:

$$H = \frac{Ct}{2},$$

де C – швидкість поширення ультразвукових хвиль у виробі, t – часовий інтервал між зондувальним імпульсом та імпульсом від дефекту.

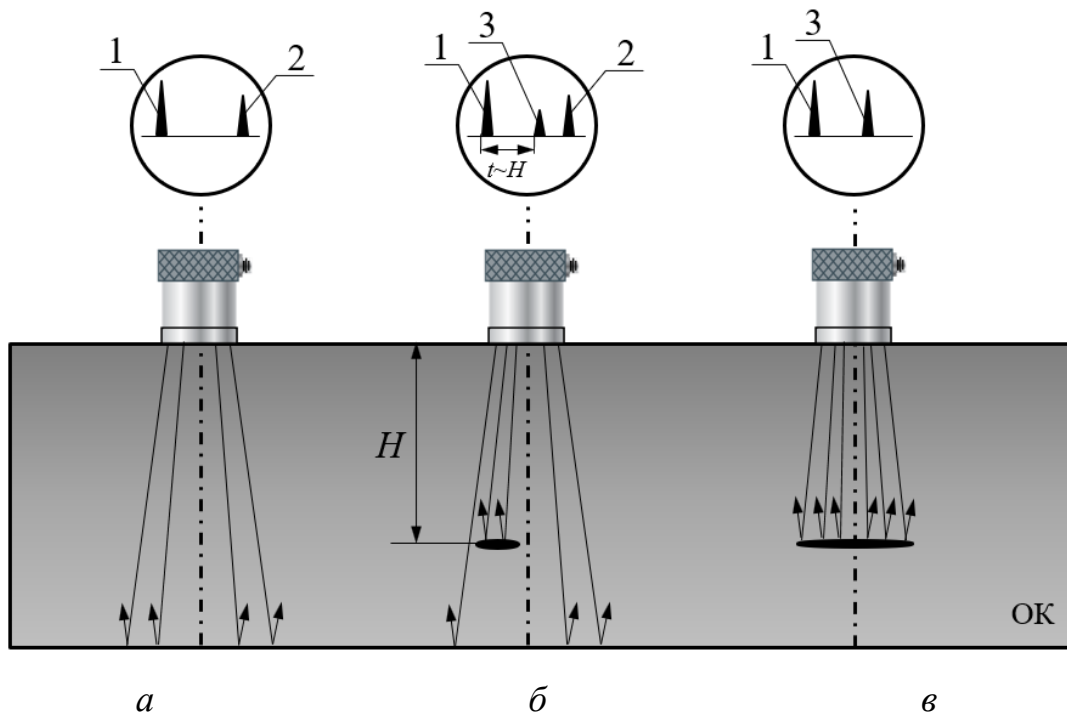


Рис. 9.1. Схема прозвучування луна-імпульсним методом:

a – формування донного імпульсу; *б* – формування імпульсу від дефекту;
в – «затінений» донний імпульс

Контроль виробів здійснюється як за допомогою подовжніх хвиль (при нормальному уведенні), так і за допомогою поперечних, поверхневих або нормальних хвиль (при похилому уведенні).

Основними параметри луна-імпульсного методу є: довжина хвилі λ , кут уведення α , мертва зона (тривалість $\tau_{\text{мз}}$ або глибина $h_{\text{мз}}$), фронтальна роздільна здатність (ширина θ кутового захоплення), роздільна здатність по глибині (дальності) та чутливість.

Ці параметри методу визначаються наступними параметрами апаратури: тип і розмір перетворювача, робоча частота f_0 , кут призми β , тривалість зондувального імпульсу τ_z та ревербераційних шумів $\tau_{\text{ш}}$, рівень налаштувань чутливості дефектоскопа за еталонним відбивачем.

Місцеположення дефекту у виробі визначають дві координати: глибина залягання дефекту H , яка визначається вздовж нормалі до поверхні, та відстань

від центру випромінювання перетворювача до дефекту уздовж поверхні виробу L .

Глибиноміром пристрою вимірюють часовий інтервал τ між зондувальним імпульсом та луна-сигналом від дефекту. Для похилого перетворювача, що дозволяє уводити поперечні хвилі, при відомих швидкостях ультразвуку у виробі і призмі та відомому куті уведення за виміряним часовим інтервалом τ можна визначити H і L (рис. 9.2):

$$H = \frac{(\tau - \frac{2r}{C_{\Pi}}) \cdot C_t}{2} \cdot \cos \alpha ,$$

$$L = \frac{(\tau - \frac{2r}{C_{\Pi}}) \cdot C_t}{2} \cdot \sin \alpha ,$$

де r – геометрична довжина акустичної затримки (призми), C_{Π} і C_t – швидкості поширення ультразвукових повздовжніх хвиль в призмі та поперечних в об'єкті контролю відповідно.

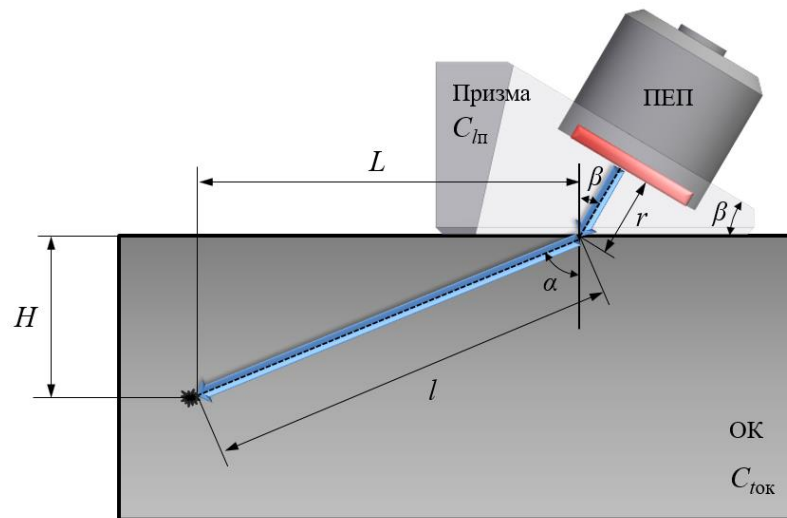


Рис. 9.2. Променева картина при похилому уведенні ультразвуку в об'єкт контролю

Відстань від точки уведення ультразвуку у виріб до дефекту розраховується як:

$$l = \frac{(\tau - \frac{2r}{C_p}) \cdot C_t}{2}$$

В ультразвуковій дефектоскопії про розміри реальних дефектів судять за амплітудою віддзеркаленого від них сигналу, оскільки амплітуда цього сигналу пропорційна площі дефекту. При цьому користуються відносним методом визначення амплітуди, який полягає у порівнянні луна-сигналу від дефекту з опорним сигналом, отриманим тим же перетворювачем від відбивача відомої величини і геометричної форми.

Ультразвуковий перетворювач під час роботи в луна-імпульсному режимі після випромінювання приймає віддзеркалений від відбивача сигнал через проміжок часу, який рівний подвоєному часу пробігу до відбивача. Якщо не враховувати згасання та вважати, що в ближній зоні поле є однорідним і не виходить за межі трубки випромінювання, то випромінювана хвиля в її плоскій частині поверталася б назад від дуже великого відбивача (рівного або більшого за діаметр самого випромінювача) практично повністю, тобто амплітуда луна-сигналу склала б A_0 (рис. 9.3а). Проте від відбивача меншої площі S_d (рис. 9.3б) повертається тільки хвиля, амплітуда A_d якої пропорційна цій меншій площі. Відношення обох цих луна-сигналів, очевидно, відповідає відношенню площ відбивача і випромінювача:

$$\frac{A_d}{A_0} = \frac{S_d}{S_0}$$

Луна-сигнал A_0 є важливим віддзеркаленим сигналом, з яким проводиться порівняння. На практиці його отримують як луну від задньої стінки тонкої бездефектної пластини з того ж матеріалу, що і зразок, де оцінюється луна-сигнал від дефекту. Оскільки площа перетворювача S_0 відома, то, якщо знайти співвідношення амплітуд луна-сигналу від відбивача та від задньої стінки, наприклад, у вольтах (або висот піків обох сигналів, що послідовно з'являються на екрані), то буде відомий розмір відбивача (дефекту) S_d .

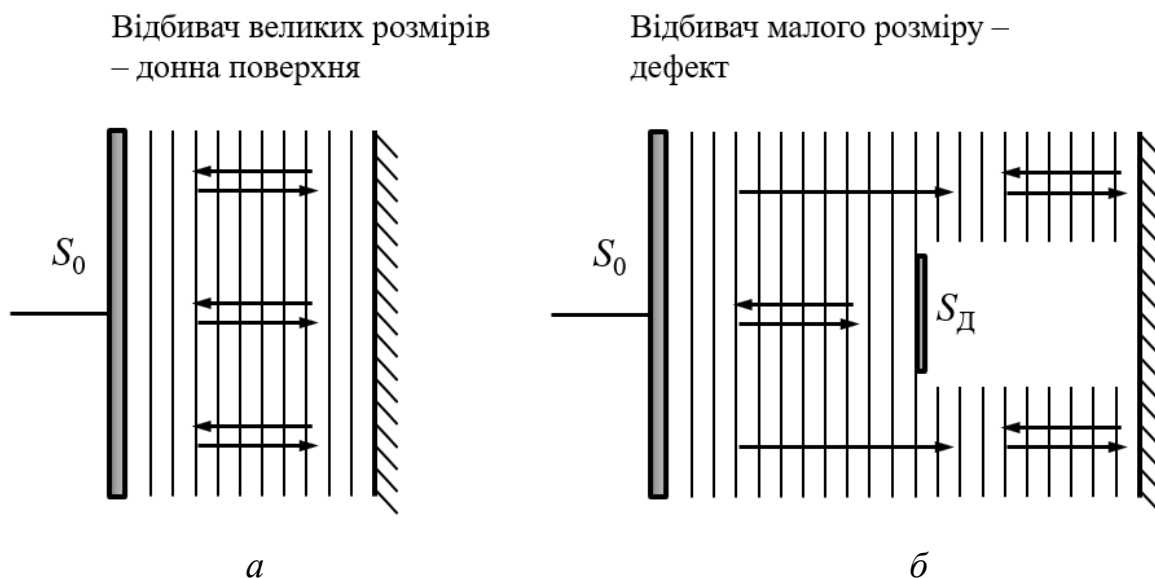


Рис. 9.3. Віддзеркалення хвилі: a – плоский відбивач в полі плоскої хвилі;

$б$ – одна відбита плоска хвиля

Оскільки реальні дефекти у виробі можуть мати складну геометричну форму, то їх дійсну площу визначити вкрай складно. Тому як уніфіковану одиницю вимірювання величини дефекту використовують еквівалентну площу дефекту (або еквівалентний діаметр). Еквівалентну площу дефекту S_e вимірюють площею дна плоскодонного отвору, розташованого на тій же глибині, що і дефект, який дає ту ж саму амплітуду сигналу, що і дефект. Фактично, $S_e \approx S_д$.

Застосовують два способи вимірювання еквівалентної площі дефектів:

- 1) за допомогою випробувальних зразків;
- 2) за АВД-діаграмою (графіками сімейства безрозмірних кривих «Амплітуда - Відстань - Діаметр»).

Перший спосіб вимагає великої кількості зразків з широким набором плоскодонних відбивачів із різним діаметром та глибиною залягання, виготовлених з того ж матеріалу, що і об'єкт контролю.

Частіше користуються другим способом. При нормальному введенні ультразвуку в об'єкт контролю еквівалентний розмір дефекту визначають за

допомогою безрозмірної АВД-діаграми (рис. 9.4) у наступній послідовності (при цьому загасання ультразвуку не враховується):

1. Спочатку на бездефектній ділянці зразка визначають амплітуду донного сигналу A_0 (у вольтах або відносних одиницях).

2. Далі починають сканувати датчиком по поверхні зразка та спостерігати за екраном дефектоскопу в очікуванні появи сигналу від дефекту. Коли дефект виявлено, то вимірюють його амплітуду A_d (у вольтах або відносних одиницях).

3. Якщо амплітуди обох сигналів були виміряні у вольтах при однаковому загальному коефіцієнті підсилення, то розраховують співвідношення цих сигналів за формулою:

$$Y = 20 \lg \left(\frac{A_d}{A_0} \right)$$

Отримана величина Y буде ординатою на АВД-діаграмі.

4. Одночасно із цим визначають глибину залягання знайденого дефекту H . Сучасні дефектоскопи дозволяють це робити автоматично і виводять інформацію про глибину залягання на екрані.

5. Глибина залягання H використовується для розрахунку абсциси на АВД-діаграмі:

$$X = \frac{H}{r_{\text{бл}}},$$

де H – глибина залягання дефекту, $r_{\text{бл}}$ – ближня зона поля випромінювання, яка розраховується за наступною формулою:

$$r_{\text{бл}} = \frac{D^2}{4\lambda_{\text{ок}}} = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot C_{\text{ок}}},$$

де D – діаметр п'єзоперетворювача, f – частота ультразвуку, $\lambda_{\text{ок}}$ – довжина хвилі в зразку, $C_{\text{ок}}$ – швидкість ультразвуку в зразку.

6. Отримані величини відкладаються на абсцисі та ординаті графіку сімейства кривих АВД (рис. 9.4). Далі на графіку визначається крива із сімейства, яка є найближчою до точки перетину абсциси та ординати.

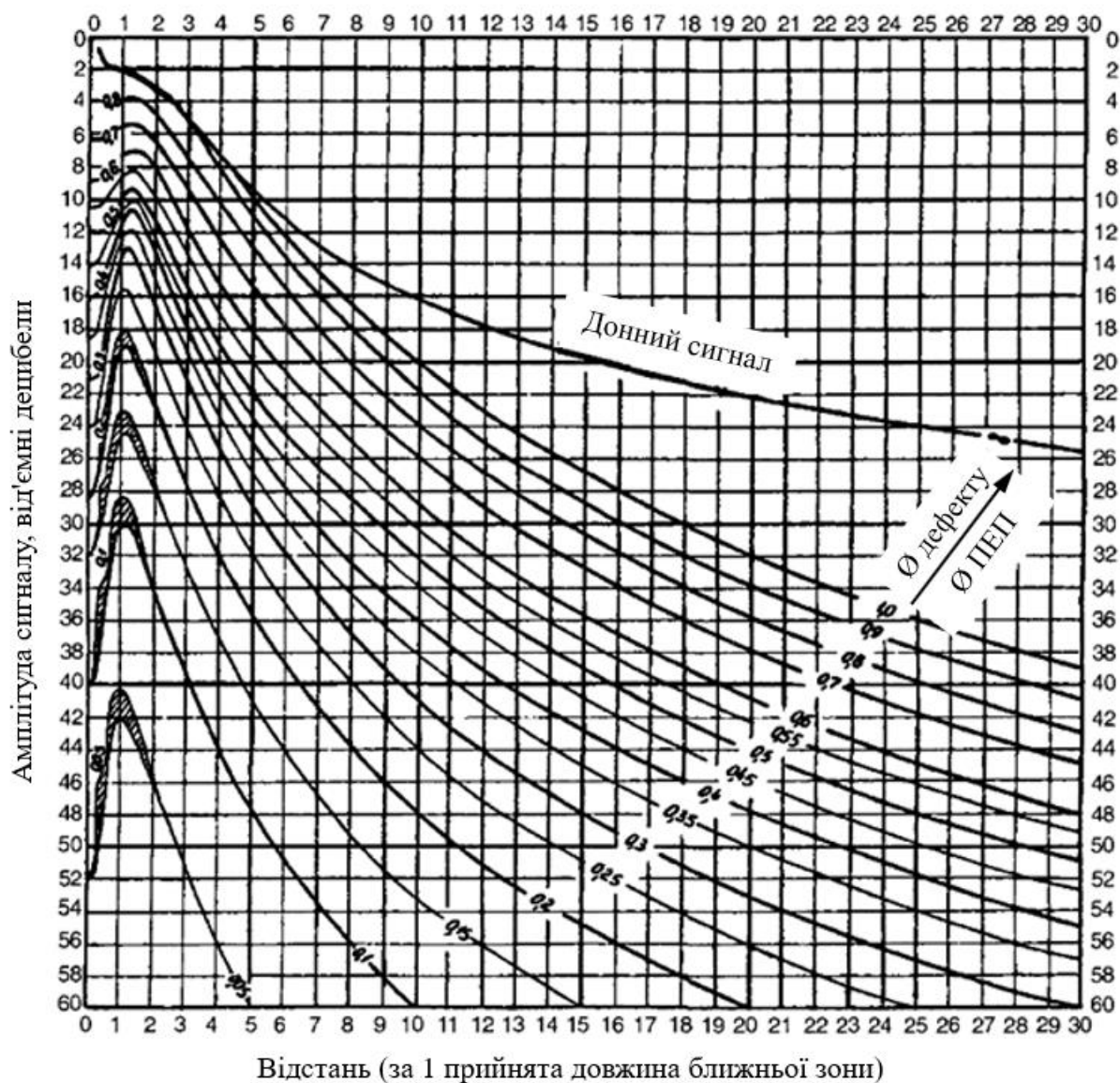


Рис. 9.4. Безрозмірні криві «Амплітуда-Відстань-Діаметр»
(ABД-діаграма) для луна-методу з лінійним масштабом по осі абсцис

Кожна крива відповідає безрозмірній величині, яку отримують як співвідношення еквівалентного діаметру відбивача d до діаметру перетворювача D . Таким чином, знаючи діаметр перетворювача та знайшовши на графіку безрозмірну величину, можна розрахувати еквівалентний діаметр відбивача. Наприклад, якщо знайдена безрозмірна величина становить 0,2, а діаметр перетворювача становить 8 мм, то еквівалентний діаметр відбивача $d=0,2 \cdot D=1,6$ мм.

Для визначення ординати може бути використаний трохи інший підхід, ніж описаний у пп. 1-3. Спочатку на бездефектній ділянці фіксують амплітуду донного сигналу таким чином, щоб вона займала $3/4$ висоти екрану дефектоскопу, і запам'ятовують, яким був загальний коефіцієнт підсилення при цьому. Далі виконують пошук дефекту і у випадку його виявлення фіксують його амплітуду на тій самій висоті екрану ($3/4$), запам'ятовуючи коефіцієнт підсилення, який був встановлений при цьому. Тепер, маючи два значення коефіцієнтів підсилення, знаходять їх різницю – це і буде шукана ордината на АВД-діаграмі.

Для врахування загасання ультразвуку в матеріалі виробу слід накласти на розмірну діаграму АВД з лінійним масштабом по осі абсцис прозорий планшет з горизонтальними лініями, повернути його на кут φ і використовувати його лінії замість горизонтальних ліній діаграми. Для визначення кута φ вибирають на будь-якій горизонтальній лінії координатної сітки АВД-діаграми точку з великим значенням H (чим більше H , тим вища точність). Далі знаходять добуток $2 \cdot \delta \cdot H$ [Нп], де δ – коефіцієнт згасання в досліджуваному матеріалі (Нп/м), H – глибина (м).

Для того, щоб перевести отримане значення у децибели, необхідно помножити його на коефіцієнт 8,68.

Цю величину відкладають по осі ординат вниз від перетину з вибраною горизонталлю і визначають другу точку. Пряма, проведена через дві знайдені точки, має шуканий кут нахилу φ .

9.2. Налаштування та принципи роботи з ультразвуковим дефектоскопом

Ультразвукові дефектоскопи загального призначення застосовуються для контролю матеріалів, готових виробів, напівфабрикатів і зварних (паяних) з'єднань на наявність дефектів типу порушення суцільності та виявлення порушення однорідності.

Кожен ультразвуковий дефектоскоп має специфічні налаштування. Тому, перш ніж виконувати вимірювання, необхідно ознайомитись з інструкцією з експлуатацію конкретного зразка дефектоскопу.

У цій лабораторній роботі використовується дефектоскоп УДЗ-71, інструкцію з експлуатації якого можна отримати в електронному вигляді у викладача або завантажити з інтернету, скориставшись пошуком. Під час підготовки до виконання лабораторної роботи студент повинен заздалегідь ознайомитись з розділами інструкції, які визначають, яким чином за допомогою дефектоскопу УДЗ-71 автоматично вимірювати глибину залягання дефекту, налаштовувати строби, вимірювати співвідношення амплітуд двох сигналів та налаштовувати схему часового регулювання чутливості (ЧРЧ).

9.3. Експериментальна частина

Ознайомитися з дефектоскопом, вивчити порядок включення і роботу з дефектоскопом згідно інструкції з експлуатації (видається викладачем). Налаштувати дефектоскоп на максимально можливу чутливість (умовну), ЧРЧ може бути вимкненим.

Об'єктами контролю є плоскопаралельні зразки зі сталі, в яких штучно створені дефекти на заданій глибині та заданого розміру. У заданих зразках необхідно виявити усі дефекти і виміряти:

- координати дефектів;
- амплітуди донного сигналу та сигналу від дефекту (або їх співвідношення);
- мінімальну умовну чутливість дефектоскопа із заданим перетворювачем, при якій виявляється дефект.

Розрахувати за АВД-діаграмою (рис. 9.4) еквівалентні розміри знайдених дефектів.

Зробити висновки по роботі.

9.4. Оформлення експериментальних результатів

Результати вимірювань і розрахунків звести у таблицю 9.1, де дати короткий опис кожного дефекту.

На рисунку-проекції зразка (розміри зразка попередньо виміряти) відзначити центри виявлених дефектів крапками, поряд з якими повинен стояти простий дріб: чисельник – глибина залягання дефекту, знаменник – його еквівалентний діаметр.

Табл. 9.1 Результати розрахунку еквівалентних розмірів дефектів

№ де- фекту	Співвідношення амплітуд сигналу від дефекту та донного, дБ	Глибина залягання H , мм	Еквівалентний розмір дефекту d , мм	Координати дефекту по поверхні зразка, мм	
				X	Y
1					
2					
...					
N					

Таблицю 9.1 та рисунок-проекцію зразка роздрукувати на окремих аркушах і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

9.5. Контрольні запитання

1. Що розуміють під еквівалентним розміром дефекту? Чому в практиці ультразвукової дефектоскопії користуються поняттям «еквівалентний розмір дефекту»?

2. Як визначити глибину залягання дефекту при луна-імпульсному контролі: а) прямим ПЕП; б) похилим ПЕП?

3. Чому на АВД-діаграмі використовується логарифмічна шкала по осі ординат?

4. Для чого використовується схема часового регулювання чутливості в дефектоскопі? Поясніть принцип її роботи.

5. Що представлено на АВД-діаграмі та як з нею працювати?

6. Як врахувати згасання ультразвуку в матеріалі ОК при визначенні еквівалентного розміру дефекту при роботі з АВД-діаграмою?

7. Де слід очікувати появу відбитих від дефектів імпульсів? Поясніть розподіл амплітуд сигналів на розгортці дефектоскопу.

8. Поясніть, як налаштувати дефектоскоп УДЗ-71 для автоматичного вимірювання глибини залягання дефекту та автоматичного вимірювання співвідношення амплітуд двох сигналів.

Список використаних джерел для лабораторної роботи №9

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.

2. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н.П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.

3. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под ред В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

4. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.

5. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия / Б.И. Выборнов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

6. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В.Г. Щербинский. – М.: «Тиссо», 2003. – 328 с.

Лабораторна робота № 10

ПОШУК ДЕФЕКТІВ У БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ МЕТОДОМ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ

Мета роботи: ознайомитись з методом вільних коливань, що використовується для пошуку дефектів у виробах з шаруватих пластиків, а також у багатошарових конструкціях з металевих і неметалевих матеріалів.

10.1. Основні положення

Метод вільних коливань передбачає відсутність постійного сильного акустичного зв'язку між ОК і системою збудження-прийому коливань. Проте повна відсутність зв'язку з ОК робить неможливим збудження коливань і їх приймання, тому насправді такий зв'язок є. Найчастіше він реалізовується через короткочасний удар індентера по поверхні виробу.

Розрізняють інтегральний та локальний метод вільних коливань. Інтегральний метод полягає у дослідженні спектру збуджених вільних коливань у межах всього ОК (наприклад, під час перевірки скляного посуду, музичних інструментів, лопаток турбін тощо). У цьому випадку в спектрі коливань можуть виникнути додаткові частоти, наприклад, у вигляді брязкоту, що відрізняє їх від «чистого звуку».

На відміну від інтегрального, локальний метод використовують для контролю багатошарових, неметалевих та композиційних конструкцій і матеріалів (рис. 10.1).

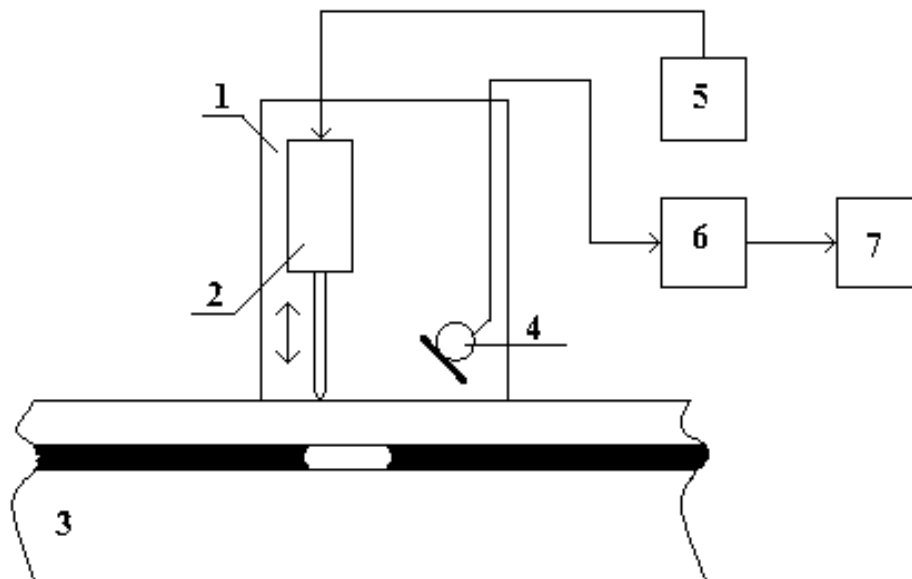


Рис. 10.1. Реалізація локального методу вільних коливань

У верхній частині ОК 3 (наприклад, у багатошаровій панелі) збуджують коливання за допомогою індентера 2 (знаходиться у корпусі 1), що керується генератором прямокутних імпульсів 5. Коливання сприймаються мікрофоном або п'єзоелектричним перетворювачем 4, підсилюються підсилювачем 6 та подаються на індикатор і аналізатор сигналів 7. Смуговий підсилювач дозволяє вибрати певну частоту, на якій найвиразніше проявляється відмінність при переході з бездефектної зони у дефектну.

Під час удару формується широкий спектр частот (як при збудженні одиничним імпульсом). Після збудження стінки виробу або окремі шари продовжують коливатися на частотах власного резонансу або на гармоніках, які можуть бути розраховані за формулою:

$$f = \frac{C_{\text{ок}}}{2h} \cdot n,$$

де $n=1, 2, 3$ – номер гармоніки, $C_{\text{ок}}$ – швидкість ультразвукової хвилі в ОК, h – загальна товщина ОК.

10.2. Опис лабораторного стенду

10.2.1. Основні технічні характеристики

Для виконання роботи використовується дефектоскоп АД-50У, побудований на базі спектрального акустичного методу контролю.

Дефектоскоп дозволяє контролювати вироби як з плоскими, так і з криволінійними поверхнями.

Максимальна площа дефекту, що виявляється, у товщині матеріалу становить $0,5 \text{ мм}^2 - 2 \text{ см}^2$. Зі збільшенням глибини залягання мінімальна площа дефекту збільшується. Максимальна площа дефекту, що виявляється, у товщині виробів з неметалевих матеріалів становить $30 \text{ мм}^2 - 15 \text{ см}^2$.

Діапазон робочих частот від 1 до 20 кГц розбивається за допомогою фільтрів на 12 каналів, кожний з яких має свій підсилювач і лінійний індикатор (табл. 10.1).

Табл. 10.1 Діапазон робочих частот дефектоскопу АД-50У

№ канала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Смуга частот, кГц	1-2.5	2.5-4.0	4.0-5.5	5.5-7.0	7.0-8.5	8.5-10.0	10-11.5	11.5-13.0	13-14.5	14.5-16	16-17.5	17.5-20

Мінімальне ефективне значення напруги на вході дефектоскопа, яке може бути виміряне у будь-якому з каналів на частоті максимуму підсилення каналу і яке відповідає висоті стовпчика газорозрядного індикатора, що світиться, цього каналу, становить $100 \pm 20 \text{ мкВ}$.

Поріг включення автоматичного сигналізатора дефектів (АСД) у кожному каналі плавно регулюється в межах, що відповідають рівням свідчення газорозрядних індикаторів від 1 до 9 см.

Перехід АСД із стану «увімкнено» у стан «вимкнено» і навпаки відбувається при зміні амплітуду напруги на вході підсилювача дефектоскопа не більше, ніж на 5%.

Допустима зміна підсилення перемикачем *робота-налаштування* складає 20% на кожен ступінь. Максимальне підсилення відповідає положенню **Налаштування**, мінімальне – **Робота-3**.

10.2.2. Принцип роботи пристрою

У дефектоскопі використовується акустичний спектральний метод неруйнівного контролю, заснований на відмінності ударно-збуджуваних імпульсів у бездефектних і дефектних зонах виробу, що контролюється.

Контроль проводиться шляхом сканування виробу перетворювачем, що містить вібруючий індентер і приймач пружних коливань. Індентер періодично ударяє по поверхні виробу, викликаючи тим самим пружні коливання у ньому, а приймач уловлює ці коливання і перетворює їх в електричні сигнали, форма яких відповідає формі пружних коливань.

У електричному блоці сигнали підсилюються і аналізуються 12-канальним аналізатором спектру. Результати аналізу відображаються в аналоговій формі на світловому табло, що складається з 12-ти лінійних газорозрядних індикаторів висотою 10 см. При цьому амплітуда напруги на виході кожного каналу лінійно пов'язана з висотою стовпчика відповідного індикатора, що світиться. Використання спектроаналізатора дозволяє:

а) під час налаштування дефектоскопа вибирати ті канали, в яких дефект викликає найбільш сильну зміну рівня сигналу;

б) оцінювати характер дефектів за зміною спектру прийнятого сигналу.

Для сигналізації про наявність дефектів використовується схема АСД. Наявність дефектів відмічається включенням сигнальних лампочок, розташованих у перетворювачі і на передній панелі дефектоскопа. Схема АСД управляється суматором, вихідна напруга якого пропорційна сумі напруг на

входах каналів, підключених до входу суматора. Кількість і номери використовуваних каналів визначаються оператором після результатів аналізу спектру в бездефектних і дефектних зонах контрольованого виробу.

10.2.3. Структурна схема дефектоскопу

Структурна схема дефектоскопа без джерел живлення показана на рис. 10.2.

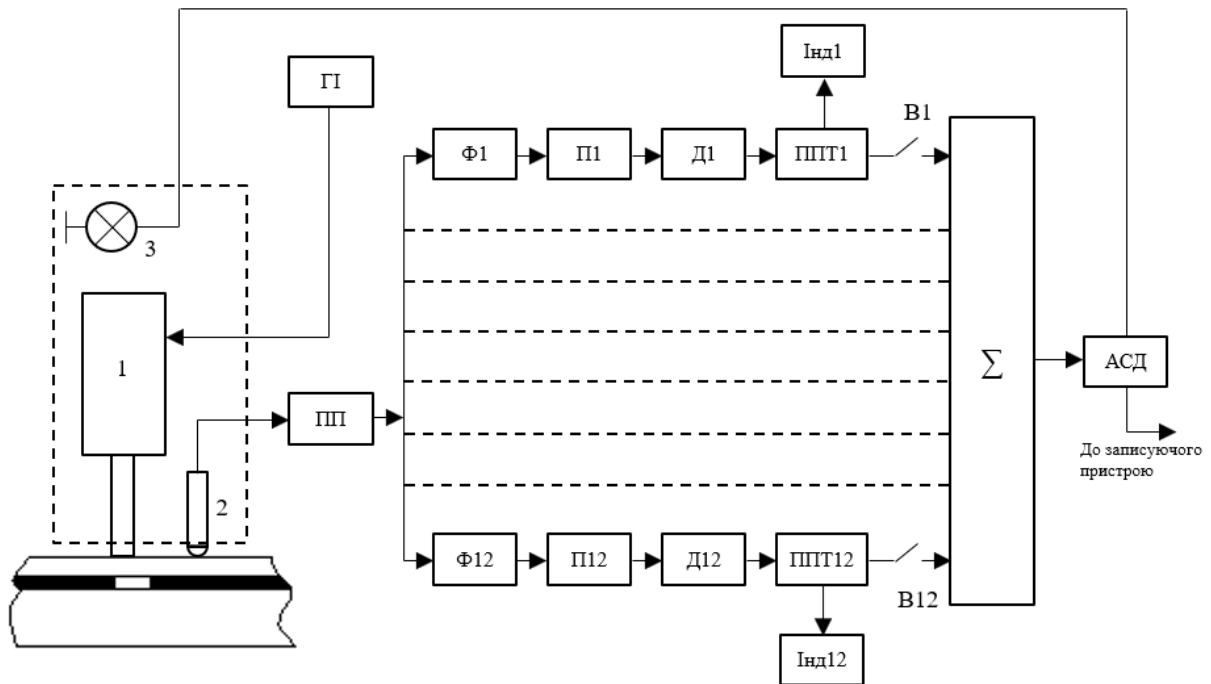


Рис. 10.2. Структурна схема дефектоскопа АД-50У

Схема складається з:

- перетворювача уніфікованого ПУ, що включає в себе електромагнітний вібратор з індентером 1, п'єзоелектричний приймач 2 пружних коливань і індикатор 3;
- генератора імпульсів ГІ, які подаються на вібратор;
- попереднього підсилювача ПП;
- 12-тиканального паралельного спектроаналізатора, кожний з каналів якого містить фільтр Ф, підсилювач П, амплітудний детектор Д, підсилювач постійного струму ППТ та лінійний газорозрядний індикатор Інд;

- суматор Σ ;
- автоматичний сигналізатор дефектів АСД.

10.3. Підготовка дефектоскопа до роботи

10.3.1. Контрольні зразки

Для вибору оптимальних режимів роботи, визначення чутливості до дефектів та налаштування дефектоскопа використовуються спеціально виготовлені контрольні зразки (еталони) зі штучними або природними дефектами різних розмірів. Ці зразки повинні мати ті ж основні параметри (товщина, матеріали шарів тощо), що і контрольований виріб.

Розміри дефектів в контрольних зразках вибирають, виходячи з норм допустимих дефектів та очікуваної чутливості на виробх цього типу.

10.3.2. Включення дефектоскопу

Спочатку заземлити корпус дефектоскопа через клему \perp заземлення, розташовану на задній стінці приладу. Включити мережеву вилку дефектоскопа в мережу. Підключити роз'єм перетворювача до відповідного роз'єму електронного блоку.

Кнопкові перемикачі з написом канали і кнопку відключення каналів перевести в положення «вимкнено» (що відповідає максимальному підвищенню кнопки над поверхнею лицьової панелі). Натиснути кнопку «настройка». Ручки «поріг» і «підсилення» поставити у крайнє ліве положення.

Натиснути кнопку перемикача «мережа». При цьому повинна загорітися лампочка індикації мережі і з'явитися свічення в нижніх частинах трубок газорозрядних індикаторів. Натиснути середню (з цифрою 2) кнопку перемикача «сила удару» і включити вібратор перетворювача розташованим на ньому повзунковим перемикачем. Рухома система вібратора (індентер) повинна почати коливатися, що свідчить про справність вібратора.

10.3.3. Налаштування дефектоскопу

Налаштування приладу проводиться на контрольних зразках.

Встановити перетворювач на контрольний зразок у зоні без дефектів і повзунковим перемикачем включити вібратор. Перемикач «робота-настройка» встановити в положення «настройка», ручки «поріг» і «підсилення» – в крайнє ліве положення. Кнопкові перемикачі з підписом «канали» повинні знаходитися у вимкненому стані, що відповідає максимальному вильоту кнопок над лицьовою панеллю.

Повернути ручку підсилення за годинниковою стрілкою так, щоб на світловому табло з'явилося зображення спектру прийнятого сигналу. Потім перемістити перетворювач у зону з дефектом і за світловим табло визначити, в яких каналах дефект викликає найбільшу різницю рівнів сигналів. Повторити ту ж операцію на інших дефектах та вибрати канали, що найсильніше реагують на дефект, що цікавить вас. Потім натиснути кнопки перемикачів каналів, що відповідають вибраним під час налаштування каналам. Далі натиснути кнопку відключення каналів. При цьому індикатори каналів, які не були підключені кнопками «канали» до АСД, припиняють світитися і не відволікають увагу оператора під час контролю.

Перемістити перетворювач у зону без дефектів і ручкою підсилення встановити рівні свічення газорозрядних індикаторів у вибраних каналах у межах 2-6 см за висотою. Переміщуючи перетворювач у бездефектній зоні, ручкою «поріг» відрегулювати прилад так, щоб включення сигнальних лампочок у перетворювачі та на передній панелі відбувалося при даних рівнях сигналів у вибраних каналах.

Натиснути одну з кнопок перемикача «робота». При цьому підсилення зменшиться і відповідно зменшаться рівні свічення індикаторів світлового табло. Натиснення кнопок з написами 1, 2 і 3 зменшує підсилення на 20, 40 і 60% відповідно. Вибір кнопки, що натискається, визначається рівнем розкиду

прийнятого сигналу у бездефектній зоні. Чим більше цей розкид, тим більшим повинен бути номер кнопки, що натискається. Проте, зі збільшенням номера кнопки зменшується чутливість дефектоскопа.

Після налаштування дефектоскопа на контрольному зразку можна перейти до контролю виробів. Після закінчення контролю вібратор слід вимкнути.

Перемикач «сила удару» слід встановлювати в положення 2 або 1. Положення 3 перемикача «сила удару» слід використовувати в тих випадках, коли при інших положеннях цього перемикача рівень прийнятого сигналу недостатній.

10.4. Порядок роботи з дефектоскопом

Після включення і налаштування дефектоскопа за зразками приступають до контролю виробів.

Під час контролю перетворювач переміщують вручну по поверхні виробу, спостерігаючи за сигнальною лампочкою, що знаходиться в перетворювачі.

Крок сканування вибирають рівним 60-80% від мінімальної протяжності допустимого дефекту.

Швидкість сканування вибирають залежно від ступеня шорсткості контрольованого виробу та необхідної чутливості. Максимальна швидкість сканування 10-15 мм/с.

Контури виявлених дефектів рисують на поверхні м'яким олівцем або крейдою за показами дефектоскопа з урахуванням відстані від краю перетворювача до осі вібратора.

10.5. Експериментальна частина

Ознайомитися із загальними положеннями та схемою дефектоскопа.

На заданих зразках виконати налаштування дефектоскопа.

Провести контроль заготовок, які видасть викладач.

Результати налаштування і контролю занести в протокол контролю, де необхідно записати:

- характеристики об'єкта контролю;
- характерні спектральні лінії (номери каналів) для бездефектних та дефектних зон;
- положення органів управління під час налаштування та контролю;
- на проекції ОК нанести контури передбачуваних дефектів для 1-го і 2-го рівнів реєстрації (робота-1 і робота-2).

Зробити висновки по роботі.

10.6. Оформлення експериментальних результатів

Виміряти геометричні розміри зразків. У бездефектних зонах, на які встановлюється перетворювач, вимірювати амплітуду сигналу на вибраних під час налаштування каналах і наносити отримане значення на нарисовану проекцію зразка. Те ж саме зробити на дефектних зонах. Контури дефектів окреслити. Отримані зображення побудувати на окремих аркушах і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

10.7. Контрольні запитання

1. З чим пов'язана вимога мінімального акустичного зв'язку ОК з системою збудження-прийому?

2. Чому інтегральний метод вільних коливань неефективний для дефектоскопії багатошарових пластиків?

3. Що таке спектр коливань? Поясніть, як пов'язані часові та частотні характеристики сигналів.

4. Що є причиною появи спектральних відмінностей між прийнятими сигналами під час переходу датчика з доброякісної зони в дефектну?
5. Поясніть принципи налаштування та роботи з дефектоскопом АД-50У?

Список використаних джерел для лабораторної роботи №10

1. Ермолов И.Н. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1991. – 283 с.
2. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н.П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
3. Инструкция по эксплуатации дефектоскопа АД-50У.
4. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности изделий из композитных материалов / А.И Потапов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 261 с.

Лабораторна робота № 11

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОКУСУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТИПУ КОНЦЕНТРАТОР

Мета роботи: ознайомитись з основними способами фокусування ультразвукових променів; дослідити принципи роботи ультразвукового концентратора.

11.1. Основні положення

Ультразвуковий пучок, який випромінюється площинним випромінювачем, унаслідок дифракції розходить в радіальному напрямку. На відстані від випромінювача інтенсивність пучка зменшується, а його перетин збільшується, що призводить до погіршення поперечної (фронтальної) роздільної здатності. Для отримання задовільної роздільної здатності та високої інтенсивності пучка застосовують фокусування.

До основних типів монолітних фокусувальних систем можна віднести наступні (рис. 11.1): активні концентратори (зігнуті випромінювачі), рефрактори (акустичні заломлюючі лінзи) та рефлектори (пасивні відбивачі). Також фокусувати ультразвук можуть розподілені перетворювачі (дефлектори, фазовані антенні решітки, комутовані матриці), проте їх спосіб фокусування суттєво відрізняється від монолітних.

У перших двох типах фокусувальних систем випромінююча або заломлююча поверхня є тілом обертання кривих відносно акустичної осі. Найчастіше перетин поверхні є частиною кола, гіперболою або частиною еліпса, відповідно і фокусувальні системи називають круговими, гіперболічними і еліптичними.

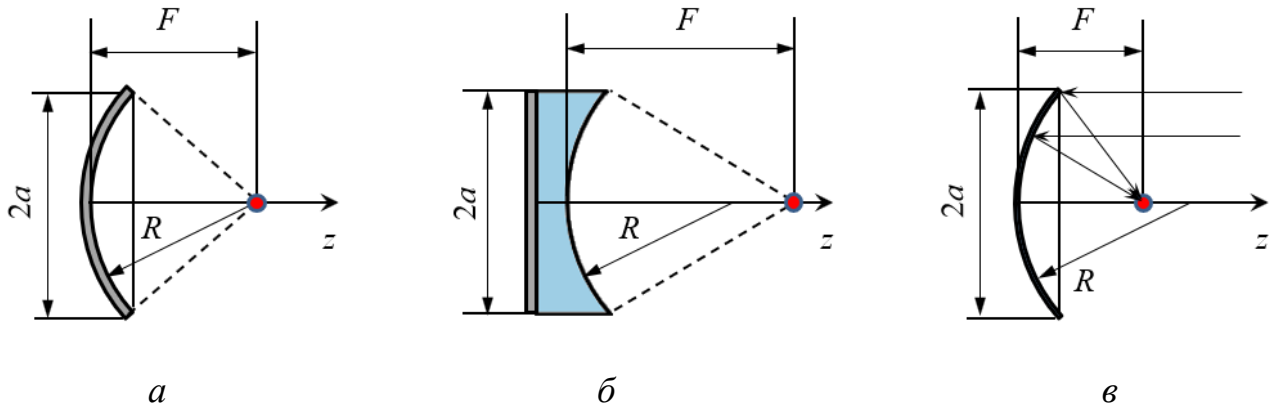


Рис. 11.1. Основні типи монолітних фокусувальних систем:

a – активний концентратор; *б* – рефрактор; *в* – рефлектор: *F* – фокус, *R* – радіус кривизни, *a* – радіус зіниці відповідної фокусувальної системи

Круговий акустичний концентратор є випромінювачем у формі частини сфери або циліндра (див. рис. 11.2). Кут розкриття фронту складає:

$$\psi_m = \arcsin\left(\frac{a}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{a}{R}\right), \quad (11.1)$$

де *R* – радіус сфери, *a* – радіус зіниці концентратора.

Активні концентратори в основному мають кут розкриття у межах $\psi_m \leq 30^\circ$ (тому що при великих значеннях кута спостерігається взаємна компенсація акустичного тиску від симетрично розташованих ділянок концентратора).

Якщо фокус розташований у дальній зоні, то використання концентратора не дає виграшу в підсиленні, оскільки в цій зоні переважають дифракційні процеси, які не дозволяють ефективно концентрувати енергію в обмеженій ділянці простору. Тому фокусування відбувається зазвичай у ближній зоні поля випромінювання.

Якщо геометричний фокус знаходиться у ближній зоні, то коефіцієнт підсилення за інтенсивністю може бути розрахований за наступною формулою:

$$K_p = \frac{S}{2\lambda_{ок} R}, \quad (11.2)$$

де $S = \pi \cdot a^2$ – площа зіниці концентратора.

Формула розподілу амплітуди акустичного тиску уздовж осі кругового концентратора має наступний вигляд:

$$P = P_0 \cdot \left| \frac{2}{1 - \frac{z}{R}} \right| \cdot \left| \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \left(\sqrt{(z-h)^2 + a^2} - z \right) \right] \right|, \quad (11.3)$$

де $h = R - \sqrt{R^2 - a^2}$, P_0 – початковий тиск; λ – довжина акустичної хвилі; z – відстань вздовж осі.

Як видно з виразу (11.3), другий співмножник є гіперболою з асимптотою $z=R$. Таким чином, геометричний або променевий фокус міститься на осі в площині $z=R=F$.

Графік розподілу тиску в фокальній зоні у площині представлений на рис. 11.2.

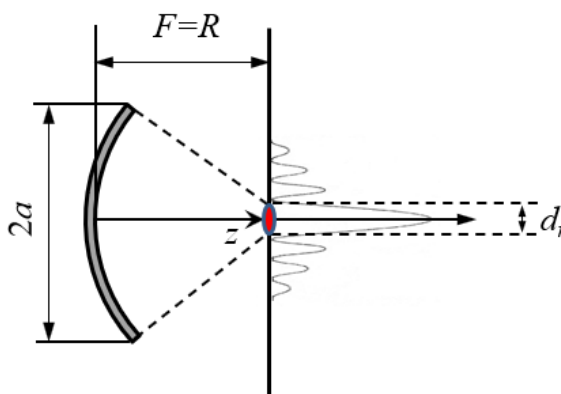


Рис. 11.2. Розподіл тиску в фокальній зоні

Діаметр фокальної плями (коло Ейрі) визначається за формулою (рис. 11.2):

$$d_r = 1,22 \frac{F \lambda_{\text{ок}}}{a} \quad (11.4)$$

Діаметр фокальної плями на рівні -3дБ визначається як (рис. 11.3):

$$d_{r(0,7)} = 1,02 \frac{F \lambda_{\text{ок}}}{a}$$

Для розрахунку поперечної (фронтальної) роздільної здатності найчастіше використовується критерій роздільної здатності, що ґрунтується на розрізненні двох точок. Два сусідні точкові джерела ультразвуку вважаються розрізненими, якщо максимум відгуку на одне з них співпадає з першим нулем відгуку на інше (релеївський критерій). У такому випадку поперечна роздільна здатність визначатиметься за наступною формулою:

$$d_{\text{релея}} = \frac{d_r}{2} = 0,61 \frac{F \lambda_{\text{ок}}}{a} \quad (11.5)$$

При одночасному спостереженні двох джерел, які розташовані на відстані $d_{\text{релея}}$ один від одного, провал інтенсивності у проміжку між ними складає 26,5%, що цілком достатньо для їх розрізнення. Цей критерій прийшов в акустику із оптики.

За глибину різкості приймається відстань між двома точками на акустичній осі обабіч фокусу, в яких акустичний тиск на 3дБ менший ніж у фокусі. На рис. 11.3 показані межі пучка, що сходиться, і формування зони різкості з глибиною $d_{z(0,7)}$ у вигляді циліндра діаметром $d_{r(0,7)}$. Пучок спочатку сходиться відповідно до законів геометричної акустики, але у зоні геометричного фокусу відхиляється від траєкторії, передбаченої геометричною акустикою.

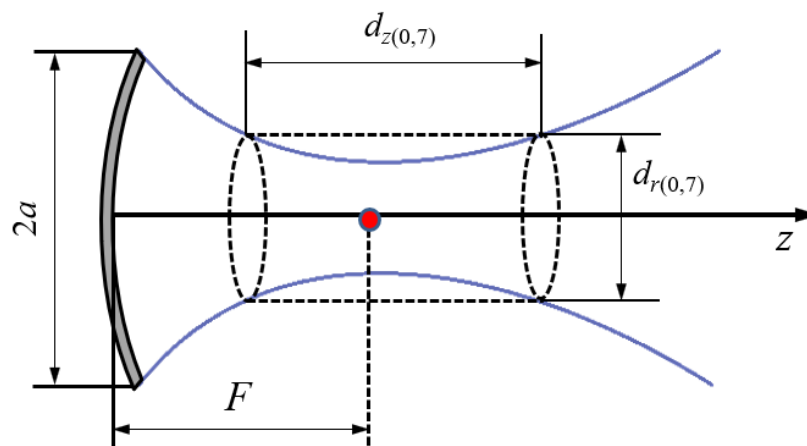


Рис. 11.3. Характеристики променя у фокальній зоні

11.2. Експериментальна установка

До складу експериментальної установки входять (рис. 11.4): 1 – ємність з рідиною; 2 – випромінювач у формі частини сфери; 3 – основа, в якій розміщено випромінювач; 4 – генератор.

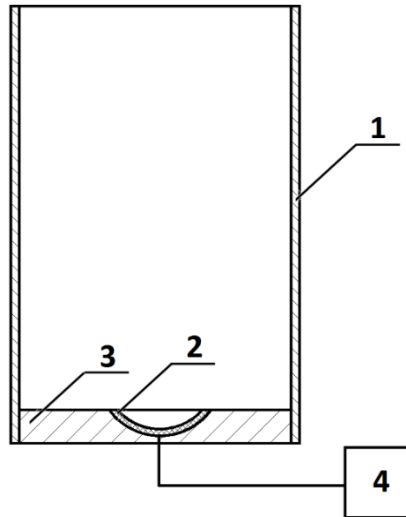


Рис. 11.4. Схема експериментальної установки

Кут розкриття концентратора, який використовується в експериментальній установці, дорівнює $\psi_m=30^\circ$. Робоча частота перетворювача 2,5 МГц.

11.3. Експериментальна частина

Ознайомитися з теорією фокусування ультразвукових променів та типами ультразвукових фокусувальних систем.

Ознайомитися з експериментальною установкою.

Експериментально визначити положення фокусу F концентратора за рахунок дослідження ефекту «ультразвуковий фонтан»: фокальна площина визначається за максимальною висотою фонтану води при поступовому підливанні рідини в посудину.

Розрахувати радіус зіниці концентратора за формулою (11.1).

Побудувати за формулою (11.3) графік розподілу тиску вздовж осі випромінювача (використовувати математичні пакети Mathcad або MATLAB).

Додати у воду крохмаль та подивитись, які явища відбуватимуться у зоні фокусу при цьому.

Зробити висновки по роботі.

11.4. Оформлення експериментальних результатів

Визначивши положення фокусу розрахувати параметри фокусувальної системи за формулами (11.1), (11.2), (11.4) та (11.5). Побудований за формулою (11.3) графік та розраховані параметри системи роздрукувати на окремих аркушах і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

11.5. Контрольні запитання

1. Що таке фокусна відстань?
2. Від яких параметрів залежить величина інтенсивності у зоні фокуса?
3. Опишіть принцип роботи акустичного концентратора?
4. Які системи використовуються для фокусування ультразвукових хвиль?
5. Від чого залежить розмір фокальної плями в зоні фокусу?

Список використаних джерел для лабораторної роботи №11

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
2. Каневский И.Н. Фокусировка звуковых и ультразвуковых волн / И.Н. Каневский. – М.: Наука, 1977. – 386 с.
3. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.

Лабораторна робота № 12

ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЗГАСАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

Мета роботи: навчитися визначати коефіцієнти згасання ультразвукових хвиль у заданих матеріалах, користуючись різними підходами до вимірювань.

12.1. Основні положення

Під час поширення ультразвукової хвилі у середовищі її амплітуда зменшується – відбувається послаблення хвилі. Головними причинами послаблення є розходження променів (точніше, дифракційне розходження) та загасання хвиль у середовищі.

Коефіцієнт загасання δ характеризує послаблення хвилі внаслідок незворотних втрат під час її поширення у середовищі. Коефіцієнт загасання складається з коефіцієнта поглинання δ_n та коефіцієнта розсіювання δ_p :

$$\delta = \delta_n + \delta_p$$

При поглинанні акустична енергія перетворюється у теплову в результаті дії теплопровідності (відвід енергії від елементарного об'єму, що зазнає розширення та стиснення), пружного гістерезису (залежність напруженість-деформація описується різними кривими при розширенні та стисненні) і в'язкості (у рідинах). При розсіюванні енергія залишається акустичною, не перетворюючись у інший вид енергії, проте у кожен момент часу поширення хвилі вона зменшується за рахунок того, що окремі промені ніби відщеплюються від основного пучка внаслідок впливу процесів віддзеркалення, заломлення та дифракції.

Для вимірювання коефіцієнту згасання δ необхідно одержати луна-сигнали A_1 і A_2 від двох строго ідентичних відбивачів, розташованих на різній відстані H_1 і H_2 . Щоб уникнути помилок за рахунок накладання на корисний сигнал сигналу, що перевіддзеркалився від стінки зразка, необхідно, щоб мінімальна відстань Δ від осі пучка до найближчої бічної поверхні задовольняла умові (рис. 12.1):

$$\Delta \geq 1.2 \frac{H \cdot C}{a \cdot f},$$

де a – радіус п'єзoelementу, f – частота, C – швидкість поздовжніх хвиль, H – товщина об'єкту.

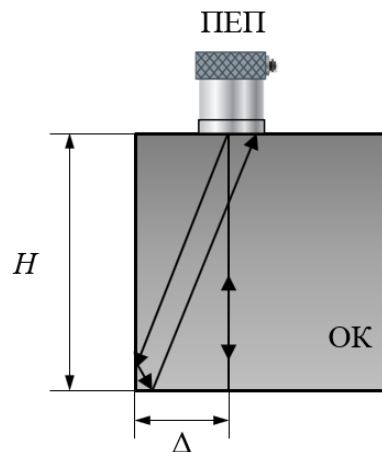


Рис. 12.1. Перевіддзеркалення сигналу від стінки зразку

Для поздовжніх хвиль (за умови наявності двох зразків одного й того ж матеріалу різної товщини) найпростіша схема вимірювання коефіцієнту згасання за донними сигналам A_1 та A_2 наведена на рис. 12.2.

Якщо усі вимірювання виконуються у дальній зоні акустичного поля (тобто, і товщина H_1 , і товщина H_2 більше трьох ближніх зон)

$$H_2 > H_1 > 3a^2/\lambda$$

то амплітуда кожного прийнятого сигналу, обумовленого віддзеркаленням хвилі від донної поверхні, може бути визначена за наступними формулами акустичного тракту:

$$A_1 = A_0 \frac{S_a}{2\lambda H_1} e^{-2\delta H_1}; \quad (12.1)$$

$$A_2 = A_0 \frac{S_a}{2\lambda H_2} e^{-2\delta H_2}. \quad (12.2)$$

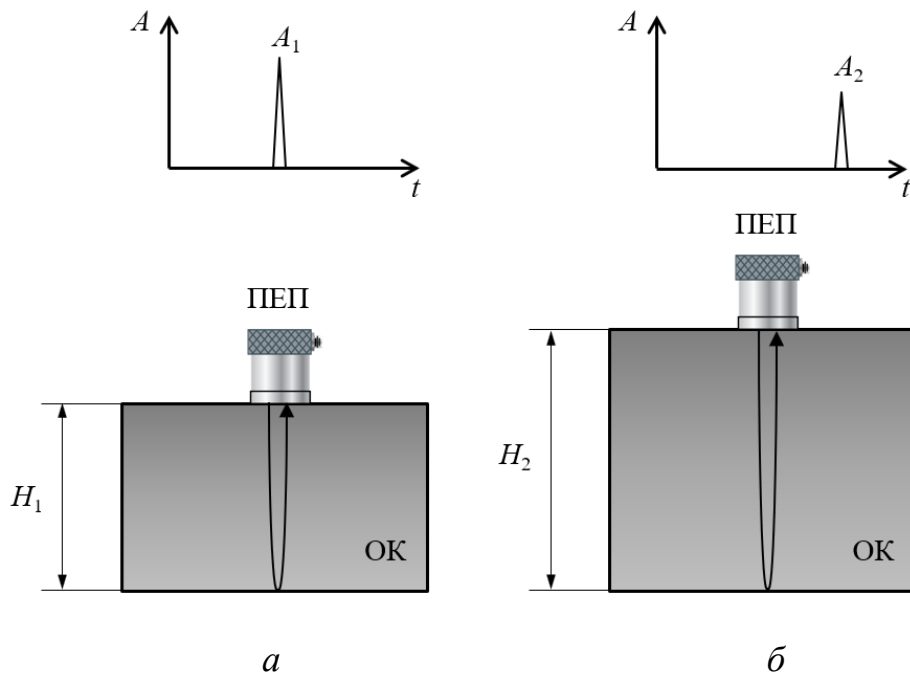


Рис. 12.2. Схема прозвучування для визначення коефіцієнту згасання: *а* – зразок меншої товщини H_1 та відповідна цій товщині амплітуда донного сигналу A_1 ; *б* – зразок більшої товщини H_2 та відповідна цій товщині амплітуда донного сигналу A_2

Для того, щоб вивести формулу для розрахунку коефіцієнту згасання δ , необхідно спочатку поділити вираз (12.1) на (12.2):

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{H_2}{H_1} e^{2\delta(H_2 - H_1)}. \quad (12.3)$$

Після чого вираз (12.3) необхідно прологарифмувати і виразити коефіцієнт загасання δ :

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - \ln\left(\frac{H_2}{H_1}\right)}{2(H_2 - H_1)} \text{ [Нп/м]}, \quad (12.4)$$

або

$$\delta = \frac{20 \lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - 20 \lg\left(\frac{H_2}{H_1}\right)}{17.37 \cdot (H_2 - H_1)} \text{ [Нп/м]},$$

або

$$\delta = \frac{20 \lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - 20 \lg\left(\frac{H_2}{H_1}\right)}{2(H_2 - H_1)} \text{ [дБ/м]}.$$

Якщо усі вимірювання виконуються у ближній зоні акустичного поля (тобто, і товщина H_1 , і товщина H_2 менше глибини ближньої зони)

$$H_1 < H_2 < a^2/\lambda$$

то коефіцієнт δ знаходять за наступними формулами:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{2(H_2 - H_1)} \text{ [Нп/м]}, \quad (12.5)$$

$$\delta = \frac{20 \lg\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{2(H_2 - H_1)} \text{ [дБ/м]}.$$

Для того, щоб забезпечити проведення вимірювань коефіцієнту згасання у межах ближньої зони, необхідно використовувати п'єзопластини збільшеного розміру. Наприклад, якщо використовувати п'єзопластину діаметром 20 мм на частоту 5 МГц для визначення згасання в матеріалі із швидкістю ультразвуку $C=5900$ м/с, то глибина ближньої зони $r_{\text{бл}}=a^2/\lambda \approx 85$ мм, що дозволяє легко знайти зразки потрібної товщини.

При відсутності двох зразків з різною товщиною можна використовувати один зразок з плоскопаралельними поверхнями, товщина якого перевищує три ближніх зони. У такому випадку визначення коефіцієнта згасання δ проводять в ньому за результатом вимірювання амплітуди першого A_1 та другого A_2 донних сигналів (рис. 12.3).

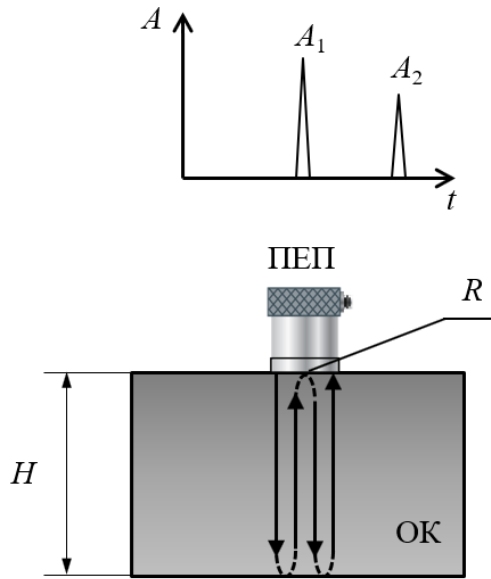


Рис. 12.3. Визначення коефіцієнту згасання при використанні одного зразка товщиною H (зверху схематично показані амплітуди двох донних сигналів)

Але у цьому випадку доводиться враховувати, що коефіцієнт віддзеркалення від поверхні зразка R , на якій встановлено перетворювач, не дорівнює 1 ($R < 1$).

Тому рівняння акустичного тракту для першого і другого донних сигналів (у дальній зоні) повинні бути представлені у вигляді:

$$A_1 = A_0 \frac{S_a}{2\lambda H} e^{-2\delta H}, \quad (12.6)$$

$$A_2 = A_0 \frac{S_a}{4\lambda H} \cdot R \cdot e^{-4\delta H}. \quad (12.7)$$

У результаті ділення виразу (12.6) на (12.7) отримаємо:

$$\frac{A_1}{A_2} = 2 \cdot R^{-1} \cdot e^{2\delta H}, \quad (12.8)$$

Після логарифмування виразу (12.8) можемо виразити коефіцієнт згасання:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) - \ln R - \ln 2}{2H} \text{ [Нп/м]}. \quad (12.9)$$

Зазвичай коефіцієнт віддзеркалення R невідомий, тому його необхідно або виміряти, або розрахувати. Розраховують цей коефіцієнт за формулою:

$$R_p = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}, \quad (12.10)$$

де z_1 – імпеданс середовища, із якого хвиля падає на межу, z_2 – імпеданс середовища, яке розташоване із протилежної сторони від межі.

Імпеданс середовища розраховуються за формулою:

$$z = \rho C, \quad (12.11)$$

де ρ – середня густина середовища, в якій поширюється акустична хвиля, C – швидкість поширення хвилі.

12.2. Експериментальна частина

Ознайомитись з описом лабораторного стенду, який складається з ультразвукового дефектоскопу, набору п'єзоперетворювачів та набору плоскопаралельних зразків заданих розмірів, виготовлених з різних матеріалів (видаються викладачем).

У довідникових таблицях (дивись в [1-3]) знайти швидкості поздовжніх хвиль, густини та коефіцієнти згасання для матеріалу кожного зразка.

Для заданих ПЕП (їх характеристики записати окремо) та ОК розрахувати протяжності ближніх зон. Отримані значення занести у таблицю 12.1.

У залежності від визначених зон контролю та видів зразків провести вимірювання амплітуд донних сигналів та розрахувати коефіцієнти згасання для кожного зразку за формулою (12.4), або (12.5), або (12.9). Отримані результати занести у таблицю 12.1. Порівняти розраховані під час виконання лабораторної роботи значення коефіцієнтів згасання для заданих матеріалів та табличні значення.

У випадку використання формули (12.9) додатково розрахувати коефіцієнт віддзеркалення за формулою (12.10). У формулу (12.10) необхідно підставляти

імпеданси матеріалу зразка та контактної рідини. Оскільки для забезпечення акустичного контакту можуть бути використані різні рідини, то попередньо необхідно з'ясувати тип використовуваної контактної рідини, після чого розрахувати її імпеданс за формулою (12.11).

Зробити висновки.

12.3. Оформлення експериментальних результатів

Розрахувати коефіцієнти згасання для заданих викладачем зразків та типів перетворювачів. Результат занести у відповідні комірки таблиці 12.1.

Перед заповненням таблиці 12.1 записати характеристики:

1. ПЕП:

- частота $f =$
- діаметр $2a =$

2. Контактна рідина:

- густина $\rho =$
- швидкість ультразвуку $C =$

Табл. 12.1. Розрахунок коефіцієнтів згасання

Матеріал зразка	Густина, кг/м^3	Швидкість поздовжньої хвилі C_l , м/с	Товщина, м	Протяжність ближньої зони, м	Розраховане значення коефіцієнту згасання, Нп/м	Табличне значення коефіцієнту згасання, Нп/м

Таблицю 12.1 з результатами вимірювань роздрукувати на окремому аркуші і прикріпити до протоколу лабораторної роботи.

12.4. Контрольні запитання

1. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт згасання? Поясніть співвідношення між цими одиницями.
2. Якими чинниками обумовлюється загальне згасання ультразвуку в матеріалі ОК?
3. Опишіть методику визначення коефіцієнту згасання при використанні одного зразку.
4. Що таке декримент згасання та логарифмічний декримент згасання?
5. Поясніть, яким чином залежить згасання від частоти?

Список використаних джерел для лабораторної роботи №12

1. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
2. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В.Г. Щербинский. – М.: «Тиссо», 2003. – 328 с.
3. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3. Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге; под ред В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
4. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник / В.К. Цапенко, Ю.В. Куц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2010. – 448 с.